

# **UNIVERSIDAD DE SONORA**

DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

**DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**“GEOLOGÍA Y MÉTODOS DE EXPLORACIÓN  
MINA LA HERRADURA, MUNICIPIO DE CABORCA”**

## **TESIS**

Que para obtener el Título de  
**GEÓLOGO**

**Presenta:**

*Juan Miguel Romero Valle*

**Hermosillo, Sonora**

**Enero del 2005.**

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Hermosillo, Sonora, 17 de Enero de 2005

M.C. Francisco Javier Grijalva N.  
Jefe del Departamento de Geología  
Universidad de Sonora  
Presente:

Por este conducto me permito someter a su consideración , para su aprobación oficial, el tema de tesis profesional titulada:

**“GEOLOGÍA Y MÉTODOS DE EXPLORACIÓN MINA LA HERRADURA,  
MUNICIPIO DE CABORCA”**

Esto con el fin de que el alumno:

**JUAN MIGUEL ROMERO VALLE**

Con el objetivo de obtener su título profesional de la carrera de Geólogo.

Considerando que los maestros Dr. Lucas H. Ochoa Landín y M.C. Ricardo Amaya Martínez han participado en la revisión del texto-borrador de la tesis, se solicita que se consideren parte del jurado de este examen profesional.

Sin otro particular, me es grato manifestarle mis mejores consideraciones.

ATENTAMENTE



**EFRÉN PÉREZ SEGURA**

Director de Tesis

C.c.p Interesado  
C.c.p Archivo



EL SABER DE MIS HIJOS  
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA  
DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

TEL. (662) 259 21 10  
FAX 259 21 11

18 de Enero, 2005.

**M.C. EFRÉN PEREZ SEGURA**

Director de Tesis  
Departamento de Geología  
Universidad de Sonora  
P r e s e n t e

Por este conducto le comunico que ha sido aprobado el tema de tesis propuesto por Usted, intitulado:

**“GEOLOGÍA Y METODOS DE EXPLORACIÓN MINA LA HERRADURA,  
MUNICIPIO DE CABORCA”**

Esto es con el fin de que el alumno:

**JUAN MIGUEL ROMERO VALLE**

pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título. Asimismo le comunico que han sido asignados los siguientes sinodales:

**DR. LUCAS HILARIO OCHOA LANDIN**  
**M.C. RICARDO AMAYA MARTINEZ**  
**M.C. EFRÉN PEREZ SEGURA**

**PRESIDENTE**  
**SECRETARIO**  
**VOCAL**

Sin otro en particular, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

**M.C. FRANCISCO JAVIER GRIJALVA NORIEGA**

Jefe de Departamento.



EL SABER DE MIS HIJOS  
HARÁ MI GRANDEZA  
DEPARTAMENTO  
DE GEOLOGIA

C.c.p. Archivo  
C.c.p. Interesado



EL SABER DE MIS HIJOS  
HARA MI GRANDEZA

**UNIVERSIDAD DE SONORA**  
**DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

TEL. (662) 259 21 10  
FAX 259 21 11

**NOMBRE DE LA TESIS:**

**“GEOLOGÍA Y METODOS DE EXPLORACIÓN MINA  
LA HERRADURA, MUNICIPIO DE CABORCA”**

**NOMBRE DEL SUSTENTANTE:**

**JUAN MIGUEL ROMERO VALLE**

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Geólogo en la Universidad de Sonora.

**DR. LUCAS HILARIO OCHOA LANDIN**

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Geólogo en la Universidad de Sonora.

**M.C. RICARDO AMAYA MARTINEZ**

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Geólogo en la Universidad de Sonora.

**M.C. EFRÉN PEREZ SEGURA**

**A T E N T A M E N T E**  
**“EL SABER DE MIS HIJOS HARA MI GRANDEZA”**

**M.C. FRANCISCO J. GRIJALVA NORIEGA**  
**Jefe de Departamento.**



EL SABER DE MIS HIJOS  
HARA MI GRANDEZA  
DEPARTAMENTO  
DE GEOLOGIA

## ***Agradecimientos***

Agradezco ampliamente a mi director de tesis y sinodales por haberme dado la oportunidad de desarrollar este tema de tesis y por ayudarme en el desarrollo de mi trabajo.

A mi madre y hermanos por su apoyo incondicional en todo momento y así finalizar mis estudios universitarios y poder llevar a cabo esta tesis, a mi novia Aurelia Bracamonte S. que siempre me estuvo apoyando y ayudando en todo lo necesario para poder terminar y alcanzar mi objetivo.

A la compañía para la cual trabajo Minera Penmont S. de R.L. de C.V. al Ing. José De La Torre, Ing. Rubén Carvajal y el Ing. Enrique García, que siempre me estuvieron presionando y ayudando para la realización de esta tesis.

A la Universidad de Sonora por darme una formación de vida a través de sus conocimientos.

## INDICE

1. Resumen .....	1
2. Generalidades .....	2
2.1. Localización y Vías de Comunicación .....	2
2.2. Breve Historia de la Mina La Herradura .....	3
2.3. Características Económicas del Yacimiento .....	4
3. Geología General	
3.1. Introducción .....	6
3.2. Estratigrafía .....	7
3.2.1. Proterozoico .....	8
3.2.2. Paleozoico .....	8
3.2.3. Jurásico .....	8
3.2.4. Terciario .....	9
3.2.5. Cuaternario .....	9
3.3. Geología Estructural .....	10
3.3.1. Marco Tectónico Estructural .....	10
3.3.2. Marco Estructural Corredor Herradura .....	12
3.3.3. Marco Estructural Local .....	12
3.4. Controles Estructurales del Mineral .....	14
4. Geología del Yacimiento La Herradura .....	17
4.1. Litología .....	17
4.1.1. Pegmatita .....	17
4.1.2. Cataclasita Cuarzo Feldespática .....	18
4.1.3. Gneis Cuarzo Feldespático .....	18
4.1.4. Gneis Cuarzo Feldespático de Biotita .....	18
4.1.5. Gneis de Biotita .....	18
4.1.6. Esquisto Calcáreo Hematizado .....	18
4.1.7. Esquisto de Clorita .....	19
4.2. Mineralogía .....	19
4.3. Alteración Hidrotermal y la Relación con la Mineralización .....	21
4.3.1. Sericítica .....	22
4.3.2. Carbonatación .....	22
4.3.3. Propilitización .....	22
4.3.4. Argilización .....	23

4.4. Tipo de Mineralización .....	23
5. Geología de Mina y Métodos de Exploración .....	31
5.1. Geología de Mina y Apoyo a la Exploración .....	31
5.2. Métodos Geofísicos de Exploración .....	35
5.2.1. Magnetometría .....	36
5.2.2. Gravimetría .....	36
5.2.3. Objetivos de Exploración .....	37
5.3. Métodos Geoquímicos de Exploración (MMI) .....	40
Conclusiones .....	49
Bibliografía .....	51

### **TABLAS**

Tabla 1. Inventario de Reservas .....	5
Tabla 2. Columna Estratigráfica .....	10
Tabla 3. Historia Tectónica de Deformación .....	15
Tabla 4. Rocas del Proterozoico .....	19
Tabla 5. Tipos de Cuarzo .....	21
Tabla 6. Comparación con otros Depósitos .....	31
Tabla 7. Valores de Fondo (Background) .....	42

### **FIGURAS**

Figura 1. Localización y Vías de Comunicación .....	3
Figura 2. Terrenos Sonora .....	7
Figura 3. Tectónica Regional .....	11
Figura 4. Falla de San Andrés .....	11
Figura 5a. Plano Geológico Local .....	13
Figura 5b. Sección Geológica .....	13
Figura 6a. Simoides Mostrando Desplazamiento Normal Izquierdo y Zonas con Vetillas “en Echelón” .....	16
Figura 6b. Pared oeste donde se aprecia el gneis cuarzo feldespático, Esquisto y vetilleo “en echelón” .....	17
Figura 7. Localización de muestras, petrografía e inclusiones fluidas .....	24
Figura 8. Mapeo Geológico de Bancos .....	32



Figura 9. Comparación Modelo Geológico vs Modelo de Leyes .....	33
Figura 10. Geología de Banquetas .....	34
Figura 11. Distribución de Muestra MMI .....	44
Figura 12a y 12b. Respuesta del MMI para Au .....	45
Figura 13a y 13b. Respuesta del MMI para Ag .....	45
Figura 14. Plano Geoquímico de MMI interpolando	
Cociente de Respuesta Au + Ag .....	46
Figura 15. Plano Geoquímico de MMI con Geología Básica	
Distrito Minero La Herradura .....	48

## 1.- Resumen

El yacimiento La Herradura fue descubierto en 1991 y es un depósito de Au con ley promedio de 1 gr/ton y contenido total superior a los 3 millones de onzas. El distrito minero La Herradura se ubica dentro de la provincia fisiográfica denominada "Sierras y Llanuras Sonorenses", la región donde se localiza el distrito La Herradura es parte del Terreno Caborca (Haxel, 1980), caracterizado por la presencia de rocas metamórficas del Proterozoico (gneis y esquisto), rocas sedimentarias del Paleozoico (caliza, dolomía y cuarcita), rocas del Jurásico Inferior (meta sedimentos y meta volcánicas); y también están presentes rocas andesíticas originadas por el sistema de Fallas de San Andrés. El depósito está ubicado en la proyección de la mega estructura Mojave – Sonora Megashear; la última parte de la historia tectónica de la región está relacionada a la apertura del Golfo de California ocasionada por el sistema de Fallas San Andrés.



Panorámica del Distrito La Herradura 1997

El yacimiento es de tipo mesotermal en zona de cizalla, controlado por un sistema pre-mineral de fallas inversas reactivadas. La mineralización de oro ocurre en vetas y

sistemas de vetillas de cuarzo, ubicadas en zonas de dilatación a lo largo de superficies de fallas desarrolladas preferentemente en la unidad de gneis cuarzo feldespático. Las zonas mineralizadas se caracterizan por la presencia de cuarzo, hematita, especularita y wulfenita. Este depósito se ha minado desde 1998 y se estima que aun tiene una vida operativa por 8 años más, debido a la continuidad de los trabajos de exploración que siempre han sido continuos. El depósito produce anualmente 250,000 onzas.

## **2.- Generalidades**

### **2.1. Localización y Vías de Comunicación**

El proyecto La Herradura se ubica a 80 km en línea recta al NW de la ciudad de Caborca, Son., tiene como coordenadas UTM N=3,447,500 - E=322,500, y coordenadas geográficas Latitud N. 31°08'58.9060" y Long. W. G. 112°51'43.2811".

Cuenta con dos importantes vías de comunicación terrestre, la carretera estatal No. 18 Caborca – Puerto Peñasco; 100 km pavimentados y 20 km de terracería y la carretera internacional Federal No. 2 Hermosillo – Santa Ana – Tijuana, con recorrido de 84 km pavimentados y 34 km de terracería. (Figura 1).

El poblado más cercano al Distrito Minero La Herradura es el ejido Juan Álvarez perteneciente al municipio de Caborca, Sonora y cuenta con pista aérea distante a 3.5 km de las instalaciones de la mina.



Figura 1.- Localización y Vías de Acceso

## 2.2. Breve Historia de la Mina La Herradura

El año 1987 marca el inicio de actividades entre las compañías Peñoles y Newmont mediante una asociación para la exploración de yacimientos de Au tipo diseminado y con un potencial mínimo de 1 millón de onzas de Au. Esta unión da como resultado una prospección regional agresiva en provincias y distritos geológicamente potenciales.

En el año de 1990 nace Minera Penmont S. de R.L. de C.V. con una participación de 56% Peñoles y 44% Newmont, siendo Peñoles el operador. Esta estrategia de exploración, después de haber realizado varios intentos fallidos, tuvo como resultado el descubrimiento del yacimiento. En este mismo año se denunció exitosamente el primer fundo minero controlado por Penmont en el proyecto La Herradura, el fundo citado y la decisión de barrenación fue una iniciativa enteramente de Peñoles.

La campaña de barrenación con circulación inversa (BCI), realizada en octubre y noviembre de 1991, da como resultado el descubrimiento del cuerpo El Yaquí, el cual fue interceptado con los barrenos HRA-04 y HRA-016 (Herradura 04, 016), después de haber encontrado más de 100 m. mineralizados con una ley promedio de Au = 0.85 gr/ton.

Subsecuentemente al interpretarse la barrenación previa fue necesario implementar geología, geoquímica y muestreo a mayor detalle para el diseño del siguiente programa de exploración. Criterios geológicos, estructurales y geoquímicos fueron guías que llevaron al descubrimiento del cuerpo Centauro, el primer barreno que lo interceptó fue el HRA-022, localizado en el extremo SE del cerro Centauro, con valores promedio de Au = 1.0gr/ton, virtualmente en toda su longitud. Este cuerpo representara el 95% en contenidos de las reservas minables; el 5% restante corresponde al Yaquí.

A partir de la geología realizada (cartografía y muestreo a detalle) y el estudio geoquímico, se vio la necesidad de la ampliación de los fondos. Estos estudios y la presencia de valores geoquímicos anómalos en oro permiten ubicar un sistema potencialmente importante de mineralización económica congruente con la estrategia planteada, además de la concepción de un modelo geológico a explorar.

### **2.3. Características Económicas del Yacimiento**

Mina La Herradura, utiliza la técnica de generar modelos de bloques para la estimación de reservas y recursos minerales del depósito, esto se debe a la necesidad de ir ajustando las diferencias que existen en toneladas de mineral y ley de Au entre modelos de reservas y reportes de mineral extraído de los tajos. Esto nos genera modelos de bloques cada vez más confiables. Los parámetros utilizados en este cálculo para determinar los valores unitarios por gramo de oro son los contemplados para todas las minas del Grupo Peñoles; estos son: cotizaciones, prioridad, volúmenes y leyes de

producción. La vida de la mina será de 6.64 años considerando los volúmenes anuales de producción planeados con 8, 700,000 toneladas a partir del 2004 hasta el agotamiento total.

En la Tabla 1 se muestran las reservas a partir de diciembre del 2003 hasta mayo del 2004, presentando las reservas del Yaquí, Centauro y Dunas, así como también el mineral depositado en patios.

La tasa de producción en La Herradura es de 761,047 toneladas de mineral al mes y material estéril en el rango de 1,245,795 toneladas.

El método de recuperación de mineral es por lixiviación el cual está formado por los llamados patios de lixiviación con bancos de 10m de altura y estos son subdivididos en celdas y se someten bajo riego por goteo o aspersores en taludes durante 90 a 120 días. Estas celdas tienen un área que varían de 11,500 a 18,500 metros cuadrados.

Posteriormente cuando baja la solución rica de los patios de lixiviación pasan por un proceso llamado Merrill-Crowe que es donde se trata la solución rica que mediante este proceso se obtiene la retorta que pasa a fundición y se obtiene el "Dore".

**Tabla 1.- Inventario de Reservas**

<b>Inventario de Reservas Mayo del 2004</b>					
	<b>Cuerpo</b>	<b>Toneladas</b>	<b>Ley Au gr/ton</b>	<b>Cont. Gr</b>	<b>Cont. Oz</b>
<b>Reservas al 31_12_03</b>	<b>Total</b>	<b>48,196,000</b>	<b>1.0480</b>	<b>50,509,408</b>	<b>1,623,580</b>
<b>Reservas al 31_12_03</b>	<b>Centauro</b>	<b>40,965,000</b>	<b>1.0420</b>	<b>42,685,530</b>	<b>1,372,215</b>
<b>Reservas al 31_12_03</b>	<b>Dunas</b>	<b>5,453,000</b>	<b>1.2200</b>	<b>6,653</b>	<b>213,873</b>
<b>Reservas al 31_12_03</b>	<b>Yaqui</b>	<b>1,778,000</b>	<b>0.6560</b>	<b>1,166</b>	<b>37,492</b>
<b>Reservas al 29_05_04</b>	<b>Centauro</b>	<b>37,622,485</b>	<b>1.0484</b>	<b>39,444,066</b>	<b>1,268,156</b>
<b>Agotamiento de Reservas</b>	<b>Centauro</b>	<b>3,342,515</b>	<b>0.9698</b>	<b>3,241,464</b>	<b>104,215</b>
<b>Minado año 2004</b>	<b>Centauro</b>	<b>3,573,317</b>	<b>0.9077</b>	<b>3,243,556</b>	<b>104,283</b>
<b>Diferencia minado en el año menos agotamiento de reservas</b>					
<b>Reservas generadas</b>	<b>Centauro</b>	<b>230,802</b>	<b>-</b>	<b>2,092</b>	<b>67</b>

<b>Mineral Depositado en Patios</b>					
	<b>Cuerpo</b>	<b>Toneladas</b>	<b>Ley Au gr/ton</b>	<b>Cont. Gr</b>	<b>Cont. Oz</b>
<b>Depositado al 31 12 03</b>	Cen Yaq	39,453,260	0.8838	34,870,608	1,121,116
Ene-04	Centauro	618,643	0.8516	526,806	16,937
Feb-04	Centauro	670,021	0.8880	594,964	19,129
Mar-04	Centauro	749,441	0.8420	631,028	20,288
Abr-04	Centauro	774,165	1.0399	805,057	25,883
May-04	Centauro	761,047	0.9010	685,701	22,046
<b>Total</b>	<b>Centauro</b>	<b>43,026,577</b>	<b>0.8858</b>	<b>38,114,164</b>	<b>1,225,399</b>
<b>Generación de Reservas</b>					
		<b>Toneladas</b>		<b>Cont. Gr</b>	<b>Cont. Oz</b>
<b>De Inicio al 31 12 03</b>		35,746,410		28,431,633	914,098
Ene-04		-58,490		-93,058	-2,992
Feb-04		71,410		-13,544	-435
Mar-04		119,098		-27,805	-894
Abr-04		41,754		109,291	3,514
May-04		57,030		27,208	875
<b>Total 2004</b>		<b>230,802</b>	<b>-</b>	<b>2,092</b>	<b>67</b>

Los números negativos que se muestran en la tabla de inventario de reservas específicamente en la parte de generación de reservas, se debe, a que el modelo, reporta en algunos meses menos producción de que lo que ore control reporta. Cuando el modelo reporta mas que ore control las diferencias son positivas. esto es para monitorear como se va comportando el modelo reconciliado cada mes; pero como se podrá ver, en mayo (en 5 meses de minado), la diferencia del modelo contra ore control son 67 onzas.

### 3. Geología General

#### 3.1. Introducción

El distrito minero de La Herradura pertenece a la provincia fisiográfica denominada "Sierras y Llanuras Sonorenses" (Raisz, 1964). La región donde se localiza La Herradura ha sido descrita como parte del Terreno Caborca (Anderson y Silver, 1981), (Figura 2); en los alrededores afloran rocas metamórficas del Proterozoico, sedimentarias del Paleozoico, volcanosedimentarias del Jurásico Inferior y volcánicas andesíticas originadas por el sistema de la Fallas de San Andrés y basaltos correspondientes al Neógeno.

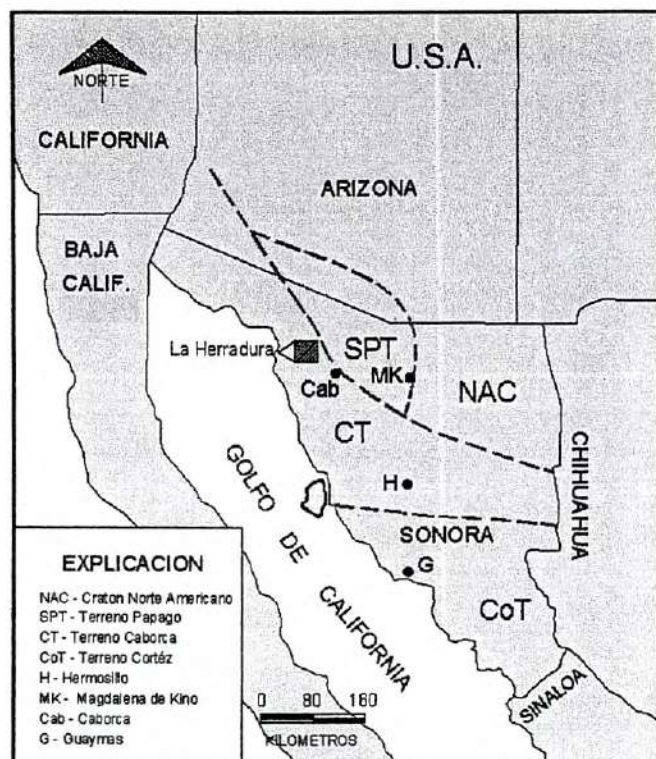


Figura 2.- Terrenos Sonora

Uno de los rasgos tectónicos más importantes del área es el que se ha postulado como Mojave - Sonora Megashield (MSM) (Anderson y Silver, 1975), o Megacizalla del Jurásico Medio. Según dichos autores la MSM tuvo un movimiento con desplazamiento lateral izquierdo lo cual provocó la división del cratón de Norteamérica, derivando en una zona truncada de márgenes del Paleozoico y Mesozoico Inferior a lo largo de la cual se formó un Arco Jurásico constituido por rocas volcánicas calcoalcalinas (Anderson y Silver, 1975).

### 3.2. Estratigrafía

Regionalmente la estratigrafía está constituida por afloramientos del Proterozoico, Paleozoico, Jurásico, Terciario y Cuaternario (De León y López, 1995). (Tabla 2).



### **3.2.1. Proterozoico**

Se encuentra representado por dos unidades litológicas principales; una de estas caracterizada por rocas con alto grado de metamorfismo constituida por anfibolita, gneis y micaesquistos, la otra corresponde a rocas plutónicas que afloran al NW y SE del Tajo Centauro. Por correlación y según edades determinadas por otros autores en la región, las rocas en conjunto se ubican en un rango de edad de 1750 Ma.

El yacimiento de la mina La Herradura está hospedado en un paquete de rocas precámbricas constituido por gneis, esquisto y diques pegmatíticos. Dentro de este conjunto de rocas el gneis cuarzo feldespático fue el más favorable a la depositación de soluciones hidrotermales debido a que esta litología fue afectada por fallamientos de ambiente frágil que actuaron antes del evento hidrotermal.

### **3.2.2. Paleozoico**

Está representado por dos unidades, la primera comprende bancos de caliza, dolomía y cuarcita fuertemente deformadas, la segunda unidad son rocas calcáreas fosilíferas poco deformadas. Con base a la presencia de corales y braquiópodos se le asignó una edad del Paleozoico Tardío (Poole et. al. 2004). Afloraban al poniente del Tajo Centauro y actualmente se encuentran sepultadas por el material estéril del Tajo Centauro.

### **3.2.3. Jurásico**

En la región afloran rocas de ambientes característicos de arcos magmáticos con litologías variadas, consiste en un complejo volcánico sedimentario y magmático con bajo grado de metamorfismo, estas rocas se clasifican como rocas metavolcánicas y metasedimentarias.

1.- Las metavolcánicas se componen de:

a) Metariolita.

- b) Metariodacita.
- c) Tobas de flujo de ceniza.
- d) Metapófido de emplazamiento subvolcánico.
- e) Metaandesita de composición calco-alcalina.

Estas rocas se localizan en la porción NE y SE del distrito.

2.- Rocas metasedimentarias con grado de metamorfismo en facies de esquistos verdes lo constituyen:

- a) Filita.
- b) Metalimolita.
- c) Metaarenisca calcárea con intercalaciones de metagrauvaca y metaconglomerado.

Esta unidad se observa a lo largo de la margen oriente de los tajos Yaqui y Centauro.

#### **3.2.4. Terciario**

Representado por rocas volcánicas que corresponden a lavas y flujos de composición traquítica y andesítica, afloran en la margen NE de La Herradura. También son de ésta edad cuerpos intrusivos ubicados en la parte NW y SE del Tajo Centauro, pertenecientes al batolito de Sonora.

#### **3.2.5. Cuaternario**

Representado por rocas de composición andesítica cuyo origen es el resultado de la emisión fisural durante la época del sistema de la Falla San Andrés como consecuencia de la actividad tectónica; se localizan desde el norte del proyecto hasta la región del Pinacate.

También encontramos material de depósito tales como arena eólica, grava con arena y grava de tipo aluvial.

**Tabla 2.- Columna Estratigráfica**

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA				
ERA	PERIODO	DESCRIPCIÓN		
CENOZOICO	CUATERNARIO	Gra	GRAVA Y ARENA	HORIZONTES DE FRAGMENTOS DE ROCA, SUB-ANGULOSOS A SUBREDONDEADOS, PARCIALMENTE CONSOLIDADOS POR ARENA EÓLICA, MAGNETITA > 1%.
		Cvb	ROCAS VOLCÁNICAS BASÁLTICAS	PRODUCTO DE EMISIÓN FISURAL, ASOCIADO AL COMPLEJO EL PINACATE, FENOCRISTALES DE PLAGIOCLASA, HORNBLENDA, OLIVINO, BIOTITA CUARZO, DIQUES BASÁLTICOS EN FORMA DE LENTES.
	TERCIARIO	Tve	ROCAS VOLCÁNICAS TRAUÍTICAS - ANDESÍTICAS	ROCAS PIROCLÁSTICAS CORRESPONDIENTES A LAVAS Y FLUJOS LOCALMENTE DE COMPOSICIÓN TRAUÍTICA Y ANDESÍTICA, SUBYACEN A LOS BASALTOS CUATERNARIOS.
MESOZOICO	JURÁSICO Inferior	Msd	METASEDIMENTOS	CONGLOMERADO, FRAGMENTOS DE ROCA DE 10cm. A 15cm. DE ESPESOR, SUBREDONDEADOS A REDONDEADOS, CON MATRIZ ARENOSA, ARENISCA, LIMOLITA, LUTITA (FILITA) Y CALIZA. METAMORFISMO EN FACIE DE ESQUISTOS VERDES, PRESENCIA DE CALCITA Y PIRITA.
		Mvs	METAVOLCANICAS ANDESITA - RIOLITA	ROCAS VOLCANOSSEDIMENTARIAS CON METAMORFISMO DE BAJO GRADO, ASOCIADAS A LA EVOLUCIÓN DE ARCO MAGMÁTICO, PRESENTA LENTES DE CUARZO DEFORMADOS.
PALEOZOICO	CARBONIFERO Pensilvanico		CALIZA, DOLOMÍA Y CUARCITA	UNIDAD CALCÁREA FOSILÍFERA (CORALES DEL PALEOZOICO SUPERIOR) PRESENCIA DE CUARCITAS, ARENISCA Y LENTES DE DOLOMÍA, METAMORFISMO DE BAJO GRADO, EN CONTACTO CON GNEIS AL W DE LA HERRADURA.
PRECAMBRICO	PROTEROZOICO Inferior		GNEIS	GNEIS CON LENTES DE ESQUISTO Y PEGMATITA, ANFIBOLITA, MICAESQUISTOS, ROCAS GRANÍTICAS.

### 3.3. Geología Estructural

#### 3.3.1. Marco tectónico regional.

Es posible a nivel regional considerar la presencia de dos fases de deformación sumamente importantes:

1.- La Mojave - Sonora Megashear; la cuál se manifiesta en la porción NW del estado de Sonora, México y la región SW de los Estados Unidos de Norteamérica. La edad corresponde al Jurásico Medio (Anderson y Silver, 1975) (Figura 3).

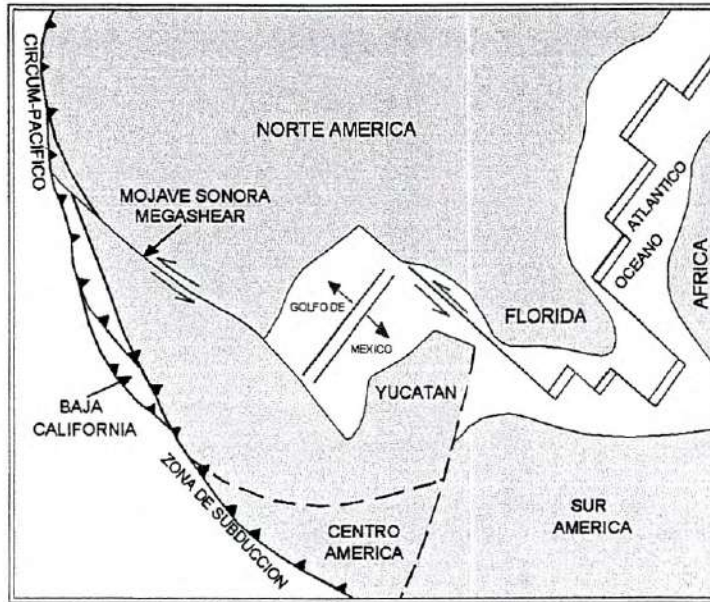


Figura 3.- Tectónica Regional

El sistema presenta fallamientos extensionales con desplazamiento lateral izquierdo, relacionado con el Arco Pacífico Este del piso marino del Pacífico Oriental.

2.- Las Fallas del sistema San Andrés son estructuras con desplazamientos laterales derecho y con un rumbo NW-SE, localizadas en la porción SE del estado de California y manifestándose en ambas márgenes del Golfo de California - México. La edad de este sistema es desde el Neógeno al Reciente (Bartolino, 1992). (Figura 4).

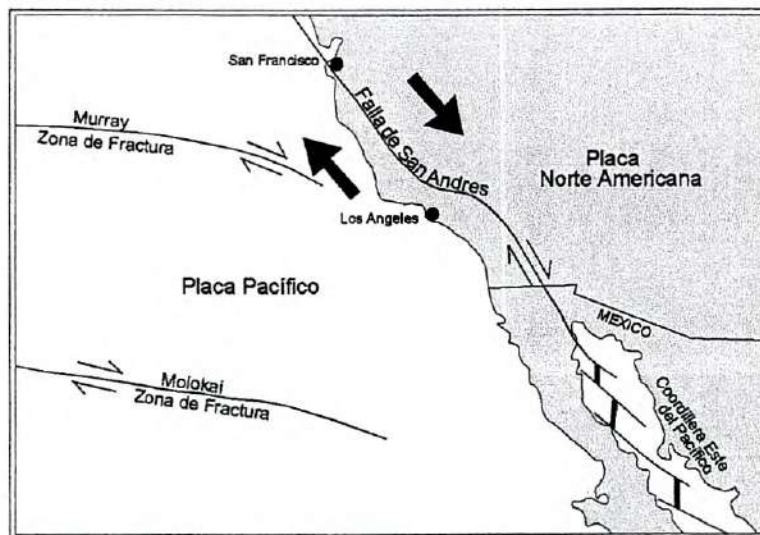


Figura 4.- Falla de San Andrés

### **3.3.2. Marco Estructural Corredor Herradura**

Es determinante un lineamiento en la distribución estructural de varios prospectos en la región y su relación con los dos sistemas antes descritos. La Mojave – Sonora Megashear se manifiesta por la orientación de los afloramientos con rumbo N30°W y por la presencia de fallas. Las estructuras relacionadas con el sistema de Falla de San Andrés están presentes en dos sistemas, uno de rumbo N55°W; donde se incluye el proyecto y el otro que corresponde a las fallas transformes de orientación N45°E.

### **3.3.3. Marco Estructural Local**

El área de La Herradura se localiza en un bloque de rumbo N50°W con dimensiones de 4X2.5 km., que comprende un paquete de rocas metamórficas cuya extensión está delimitada por dos fallas llamadas Ocotillo al SW y Victoria al NE (Salvatierra y Novelo, 1995). (Figura 5a y 5b).

Dentro de esta zona delimitada por dichas fallas se encuentran grandes lineamientos estructurales como cizallas y fallas orientadas preferentemente NW-SE y otras con orientación N-S, lo cual nos indica la orientación de los cuerpos en la mayoría de los casos y nos ayuda a definir blancos de exploración.

La información obtenida mediante los levantamientos geológicos, complementada con el análisis estructural y estudio geoquímico, permitió definir 5 blancos de exploración:

- 1.- Centauro
- 2.- El Yaqui
- 3.- Dunas
- 4.- 10 de Mayo
- 5.- Centauro Norte

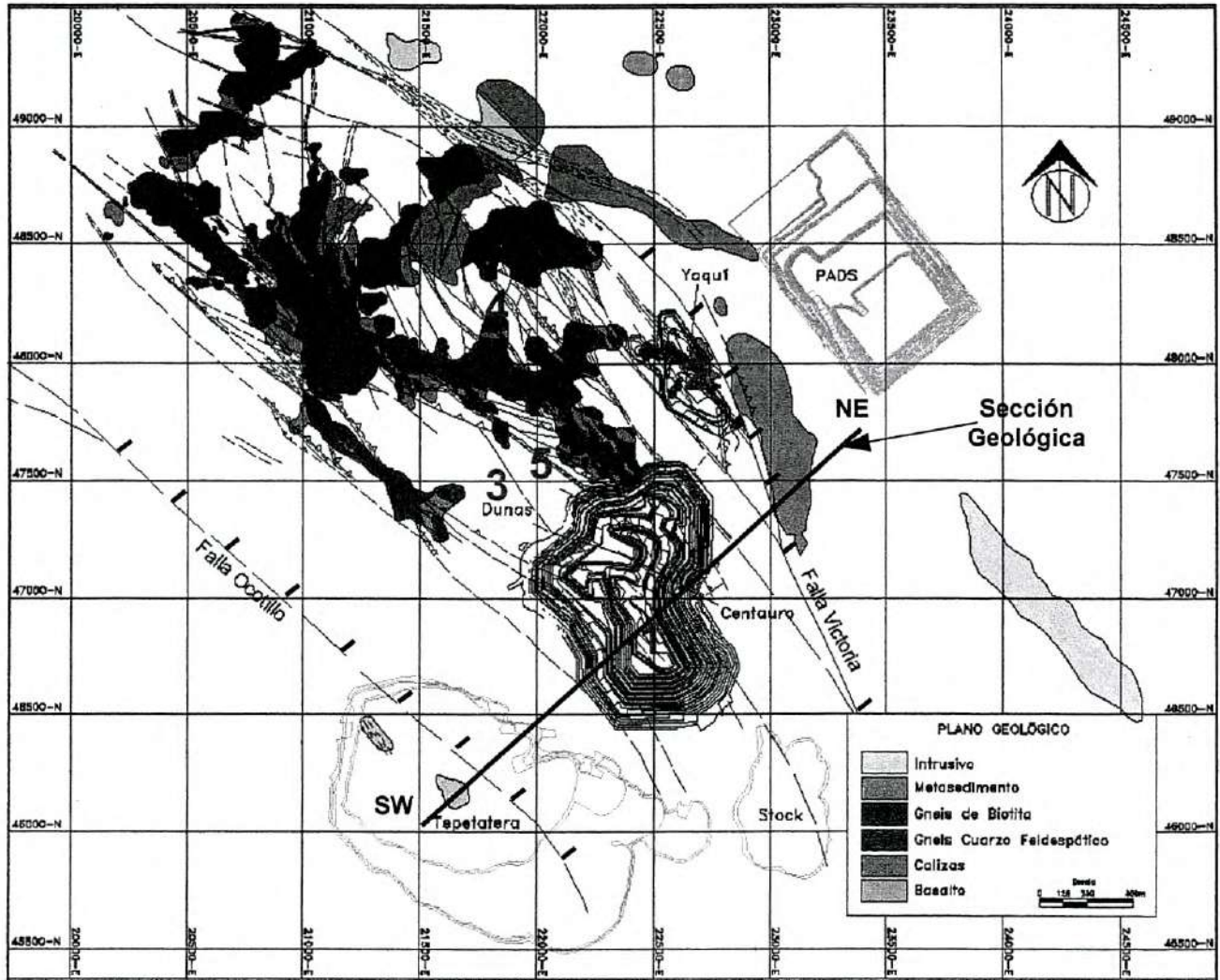


Figura 5a.- Plano Geológico Local

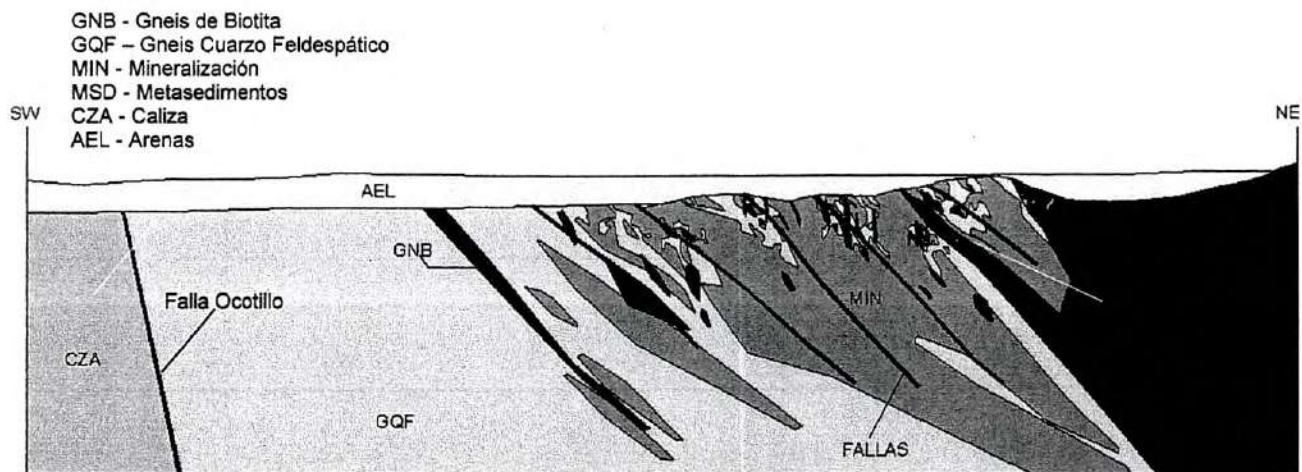


Figura 5b.- Sección Geológica

### 3.4. Controles Estructurales del Mineral

La Herradura es un depósito mesotermal de Au hospedado en una zona de cizalla controlada por un sistema pre mineral de fallas inversas reactivadas.

El depósito está formado por vetas emplazadas a lo largo de superficies de falla y arreglo de vetillas desarrolladas "en echelón" en las paredes del alto y bajo; controladas por fallas (Altamirano y Carreón, 1995). Ambos estilos de vetas son caracterizados generalmente por baja inclinación (menor a  $50^\circ$ ), y relacionados con fallamiento inverso. Algunas vetas extensionales gruesas (mayor a 20 centímetros) tienen inclinación alta (mayor a  $60^\circ$ ) y fueron emplazadas en fracturas de extensión.

En los arreglos de vetillas "en echelón", relacionados con el fallamiento inverso, comúnmente su buzamiento es menor a  $30^\circ$  y son de forma extensional, depositadas dentro de las zonas estructurales de dilatación que en conjunto se inclinan con la dirección del buzamiento estructural.

El compósito de vetas de cuarzo con Au y estériles, y el arreglo de vetillas se restringen espacialmente a las unidades más competentes de gneis cuarzo feldespático y que durante el evento hidrotermal de mineralización fue fracturado por fallas de ambiente frágil (Tabla 3) y por otro lado la mineralización también se desarrolla raramente en el gneis de biotita-clorita por ser relativamente incompetente ya que el esfuerzo fluyó plásticamente a lo largo de la esquistosidad. Las vetas y vetillas ocuparon zonas de diaclasas por dilatación extensional, diaclasas por desbloqueo y segmentos dilatados de fallas controladas por la variación del buzamiento.

Tabla 3.- Historia Tectónica de Deformación

Historia tectónica de deformación Mina La Herradura							
Edad Relativa	Edad Geológica	Ambiente Tectónico	Evento Tectónico	Sub_Evento Tectónico	Tipo de Esfuerzo	Orient. Esfuerzo Pnal. Sigma 1	Tipo de Desplazamiento
Post_Mineral			Producto de emisión fisural del sistema de Fallas San Andrés, asociada al complejo de Rocas volcánicas basálticas afloran en los valles cercanos al NE del yacimiento.				
			D5				Normal Oblicuo
	Mioceno_Med 20 - 12 Ma	Frágil Profundidad < a 10 Km	D4			NW 66 47 SE	Lateral izquierdo. Inverso Oblicuo
						NE 26 18 SW	Lateral derecho
		Frágil_Dúctil Profundidad de 12 a 10 Km		Pulso 5 D3e			Lateral izquierdo. Inverso Oblicuo
					Calcita café a blanca ± goethita; estéril.		
Pre_Mineral		Frágil_Dúctil Profundidad de 12 a 10 Km		D3d	Cuarzo, calcita ± goethita; de estéril a < cont. de Au		
				D3c	<b>Cuarzo - hematita - Oro ± wulfenita ± galena;</b>		
				D3b Pulso 2,3,4 D3b D3d	Cuarzo - goethita; de estéril a contenido menor de oro.	NE 44 35 SW	
				Pulso 1 D3a	Compresión horizontal y Extensión vertical	NE 40 41 SW	A Echado Inv. y Cabalg.
						NE_80_SW	Lateral izquierdo. Inverso Oblicuo
		Frágil_Dúctil Profundidad de 12 a 10 Km	D3	5 pulsos tectónicos de compresión	Intensa Compresión horizontal y Extensión vertical		
		Jurásico_Med. 187 - 153 Ma.	Dúctil_Frágil Profundidad de 15 a 13 Km	D2	Compresión y extensión	NE 51 SW	Inverso
				Actividad tectónica de la Mohave Sonora Mega_Shear.			
	Jurásico_Inf. 208 - 187 Ma		Unidad de rocas meta sedimentos y meta volcánicas. Rocas de Arco Magmático con metamorfismo en facies de esquistos verdes.				
	Paleozoico temprano 570 - 438 Ma		Rocas calcáreas: con intenso cizallamiento, no presentan foliación ni metamorfismo Presenta fósiles de corales clasificados como Paleozoico Tardío.				
			Orientaciones rotadas de su posición original por eventos tectónicos más jóvenes.				
	Precámbrico > a 570 Ma	Profundidad > a 15 Km		D1b	Extensión relajación		
			D1	D1a	Compresión Intensa	NE SW	Inverso con desplaz. Oblicuo
			Metamorfismo en grado de esquistos verdes / bajo facies de anfíbolita (1.750 Ma)				

En una escala de distrito, los tajos Centauro y Yaqui se centran en zonas económicas ubicadas dentro de una amplia área de fallas inversas, que normalmente son irregulares, lítricas y sinuosas. La zona tectónica de intenso fallamiento inverso con buzamiento relativamente plano es de una potencia mayor a 700 metros y de forma simoidal vista en planta. En una escala pequeña, las zonas simoidales de mineral ocurren apiladas en sección transversal. El ancho de la zona de falla debe disminuir perceptiblemente con el aumento de la profundidad y las zonas de mineral deben terminar como fallas individuales con mayor inclinación, aumentando su buzamiento a 60° en un sistema compuesto por la raíz de las fallas inversas (Caddey, 2002).



Un importante evento tectónico compresivo regional con rumbo NW-SE de extensión vertical y fallamiento inverso ocurrió en el Cretácico Superior – Terciario Inferior y es el directamente responsable de la formación de vetas y arreglo de vetillas hidrotermales de cuarzo y carbonatos que originaron el depósito de Au La Herradura. El pulso tectónico formó directamente las vetas económicas de mineral que consisten en vetas y vetillas de Qtz-Hm-Au.

En una escala regional, la zona mineralizada de La Herradura está dentro de una zona simoidal vista en planta, localizada donde la zona de falla principal, flexiona a la izquierda a lo largo del rumbo y marcadamente se ensancha en una zona masiva de fallas inversas. Esto sugiere un componente con dirección de desplazamiento de cizalla lateral izquierdo a lo largo de las zonas de la Mega Shear (Figura 6a, 6b).

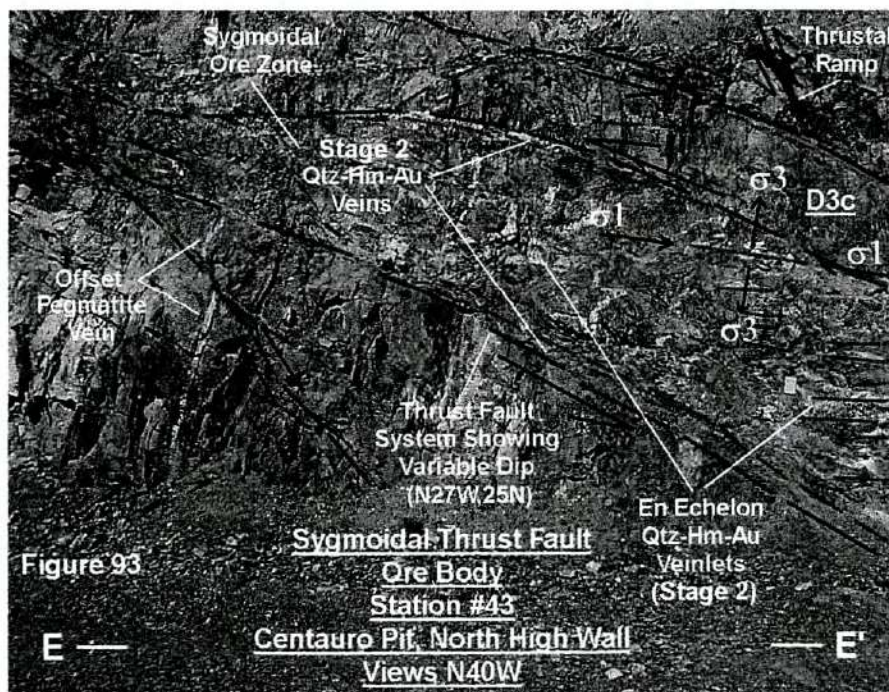


Figura 6a.- Simoides mostrando un desplazamiento normal izquierdo y zonas con vetillas en echelón (Tajo Centauro).

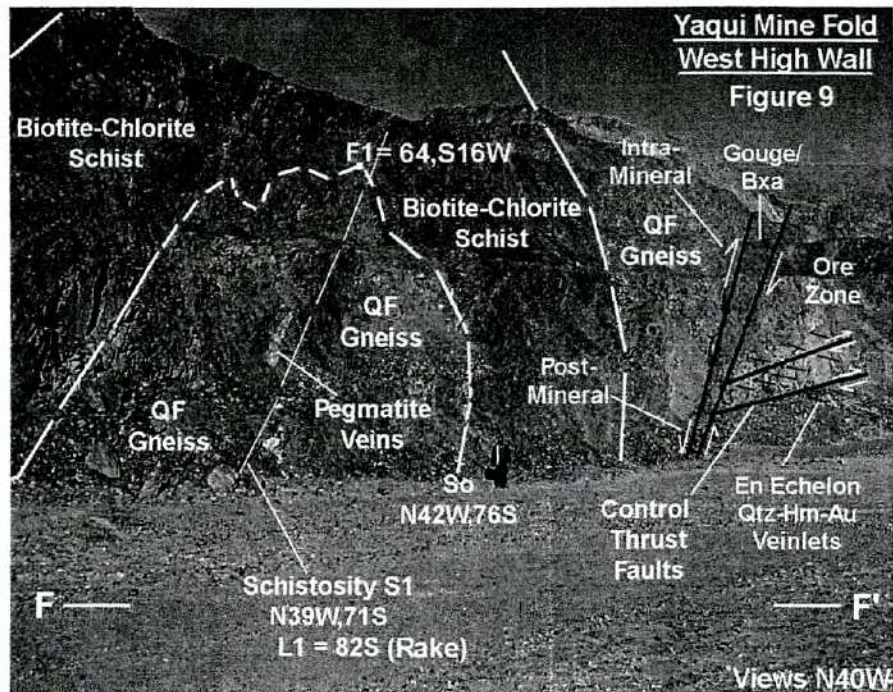


Figura 6b.- Pared oeste donde se aprecia el gneis cuarzo feldespático, esquistos y vetilleo en echelón (Tajo Yaquí)

## 4. Geología del Yacimiento La Herradura

### 4.1. Litología

Litológicamente el yacimiento está conformado por varios tipos de rocas las cuales se pueden observar dentro de los tajos Centauro y Yaquí y en las cercanías de los mismos.

La geología del tajo está representada por rocas del Proterozoico (Tabla 4) y principalmente por gneis con lentes de esquistos y diques pegmatíticos.

A continuación se describe la litología:

#### 4.1.1. Pegmatita:

Es de color verde claro con textura perfitica y compuesta mineralógicamente de cuarzo, feldespato, muscovita y biotita-clorita, presentándose en forma de diques y

cortando en ocasiones a toda la litología del tajo, con un rumbo preferencial de NW50°SE y de 0.5 m hasta 15 m de espesor.

#### **4.1.2. Cataclasita Cuarzo Feldespática:**

Se encuentra en zonas de cizalla de color café ocre, con un tamaño de grano fino y microbrechada, conteniendo minerales de cuarzo, plagioclasa, microclina y muscovita, presenta un rumbo de NW50°SE.

#### **4.1.3. Gneis Cuarzo Feldespático:**

Constituye la roca favorable para la mineralización y se encuentra en el tajo con intenso fracturamiento y numerosas vetillas de cuarzo. Se presenta de color café y de textura granoblástica equigranular con un tamaño de grano medio a fino, los minerales principales en esta roca son cuarzo, feldespato potásico, microclina, muscovita. Presenta una orientación NW50°SE y echado hacia el NE en Centauro y al SW en el Yaquí.

#### **4.1.4. Gneis Cuarzo Feldespático de Biotita:**

Roca de color verde o café con un tamaño de grano medio a fino y con una textura equigranular – granoblástica, contiene minerales de cuarzo, sericita, muscovita, microclina, plagioclasa y biotita, se encuentra orientada al NW50°SE y echado al NE en Centauro y SW en el Yaquí.

#### **4.1.5. Gneis de Biotita:**

Esta roca se presenta de color verde, tiene un tamaño de grano medio a fino, con textura equigranular – granoblástica y minerales tales como cuarzo, plagioclasa, biotita, clorita y magnetita, también presenta un rumbo preferencial NW50°SE y echado al NE en el tajo Centauro y al SW en el Yaquí.

#### 4.1.6. Esquisto Calcáreo Hematizado:

Contiene cuarzo, feldespato y sericita, se encuentra de forma tabular masiva y en ocasiones se encuentra plegado, con intensa foliación, su textura es granoblástica y presenta un color rojizo, y presenta una orientación similar a las rocas anteriores.

#### 4.1.7. Esquisto de Clorita:

Roca de color verde, muy foliada e intenso plegamiento, principalmente en la parte SW del Tajo Centauro. La textura es granoblástica con un tamaño de grano fino a medio, la mineralización es cuarzo, biotita, clorita y magnetita. Está orientada hacia el NW50°SE con un echado al NE en el Centauro y SW en el Yaquí y principalmente se encuentra en zonas de cizalla.

**Tabla 4.- Rocas del Proterozoico**

<b>Proterozoico : Gneis y esquisto con diques pegmatíticos.</b>					
Roca		Color	Textura	Mineralogía	Forma
Pegmatita.	PGM	Verde Blanco	Pertítica.	Cuarzo, feldespato, muscovita biotita y clorita.	Diques.
<b>Gneis cuarzofeldespático.</b>	<b>GQF</b>	<b>Café.</b>	<b>Granoblástica equigranular grano medio a fino.</b>	<b>Cuarzo, feldespato, microclina, muscovita.</b>	<b>Masiva roca huésped.</b>
Gneis de biotita.	GNB	Verde.	Grano medio a fino equigranular granoblástica.	Cuarzo, plagioclasa, biotita clorita y magnetita.	Masiva y en zonas de cizalla.
Esquisto café	SQC	Café Rojizo	Grano medio a fino. Foliada granoblástica.	Cuarzo, feldespato, sericita.	En zonas de cizalla.
Esquisto verde	SQV	Verde.	Grano medio a fino Foliada granoblástica	Cuarzo, plagioclasa, biotita clorita y magnetita.	En zonas de cizalla.

## 4.2. Mineralogía

En la Mina La Herradura la mineralización de oro ocurre en vetas y sistemas de vetillas de cuarzo, ubicadas en zonas de dilatación a lo largo de las superficies de fallas desarrolladas preferentemente en el gneis cuarzo feldespático.

La asociación típica del depósito es cuarzo-sericita-albita y como minerales accesorios presenta: **Hematita, Especularita, Pirita; Wulfenita, Natrojarosita, Plumbojarosita y Jarosita; Galena, Anglesita, Acantita; Argentita y Fluorita.**

Los minerales trazas presentes son: **Calcopirita, Bornita, Esfalerita; Au nativo, Electrum, Clorargirita y Yodargirita.**

Es característico de las zonas mineralizadas la presencia de cuarzo, hematita, especularita y wulfenita; el cuarzo hidrotermal se presenta en forma cristalina, masivo y blanco lechoso con rasgos de deformación. Es común la hematita terrosa como especularita y como resultado de la oxidación de la pirita.

La asociación paragenética encontrada en la Mina La Herradura es:

1. Cuarzo-Pirita
2. **\*Cuarzo-Wulfenita-Galena o Anglesita**
3. **\*Cuarzo-Especularita-Hematita**
4. **\*Cuarzo Lechoso**
5. Cuarzo-Siderita-Ankerita
6. Siderita-Ankerita
7. Calcita

\* Minerales que se encuentran asociados al oro.

Las estructuras principales son de bajo ángulo sin menospreciar las de alto ángulo que también son muy importantes y están mineralizadas. El mineral más relacionado al oro es el cuarzo y también existe otra relación mineral que es cuarzo-sericita. (Tabla 5).

**Tabla 5.- Tipos de Cuarzo**

<b>Tipos de cuarzo en La Herradura</b>		
<b>En augen gneis</b>	Estéril	Bandeado
<b>Cuarzo metamórfico</b>	Estéril	Masas compactas, blanco lechoso, blanco grisáceo en bandas delgadas de clorita.
<b>Cuarzo de pegmatita</b>	Estéril	En ocasiones mineralizado por vetilleo de cuarzo hidrotermal introducido
<b>Cuarzo de veta</b>	Asociado al oro	Masivo o compacto, cristalino y lechoso con óxidos de hierro (especularita y limonita) sericita, escasa wulfenita y trazas de albita y calcita.
<b>Vetas de carbonato ankerita - siderita</b>	Anomalía baja en oro o estéril	Con o sin cuarzo y escasa calcita.

El cuarzo que está relacionado al oro, es cuarzo cristalino y lechoso, ocurre de forma masiva o compacta, con óxidos de hierro tales como specularita y limonita, sericita, escasa wulfenita y algunas veces con trazas de albita y calcita.

Generalmente se encuentra en forma de vetas y vetillas de bajo ángulo emplazado en la unidad del gneis cuarzo feldespático.

#### **Otros minerales presentes en él depósito son:**

- Crisocola, malaquita y azurita
- Yeso (selenita)
- Barita
- Rejalgar, Oropimente
- Manganeso
- Magnetita y Jamesonita.

#### **4.3. Alteración Hidrotermal y la Relación con la Mineralización.**

Las principales alteraciones hidrotermales presentes en La Herradura son sericitica, carbonatación, propilitización y argilización.

#### 4.3.1. Sericítica.

Está muy relacionada con la presencia de cuarzo – pirita – sericita; esta última es producto de la alteración de las plagioclasas, feldespato potásico y clorita; frecuentemente se encuentra en zonas silicificadas.

Principalmente se encuentra en el gneis cuarzo feldespático de débil a fuerte y está muy relacionado a las zonas mineralizadas.

Plagioclasa, anfíbol, biotita primaria y feldespato potásico fueron alterados a sericita de débil a fuerte. Este es el resultado de la hidrólisis de los feldespatos, en un rango de temperatura de 300° a 400°C.

#### 4.3.2. Carbonatación.

a) **Siderita – Ankerita:** El halo de vetillas de siderita – ankerita se observa lateralmente a mas de 1.5 km. de las áreas mineralizadas con vetillas de cuarzo. La siderita se presenta en menor proporción con respecto a la sericita.

b) **Calcita:** Es post-mineral y se observa prácticamente en todo el depósito y está asociada con el material estéril, tales como, metasedimentos, gneis de biotita, esquisto y en ocasiones en zonas de mineral como en el gneis cuarzo feldespático.

#### 4.3.3. Propilitización.

**Clorita – epidota – calcita:** La clorita se formó a partir de la biotita, sirve de diagnóstico para la identificación de zonas estériles; se presenta como vetilleo y relleno de oquedades, este mineral está muy relacionada con la calcita.

Esta alteración se presenta prácticamente en el gneis de biotita y esquisto verde, también en menor proporción en el gneis cuarzo feldespático, pegmatita y metasedimentos. Se encuentra presente como clorita en biotita y en los bordes de los feldespatos; como epidota en fracturas y calcita en forma de vetillas.

#### **4.3.4. Argilización:**

Presente prácticamente en todas las unidades, las áreas de argilización más fuerte están en zonas asociadas principalmente a vetas y zonas mineralizadas. La alteración es de trazas fuertes sin llegar a ser pervasivas y está caracterizada por la presencia de caolinita y/o montmorillonita.

#### **4.4. Tipo de Mineralización**

La Herradura es un yacimiento mesotermal en zona de cizalla, controlado por un sistema pre-mineral de fallas inversas reactivadas. La mineralización de oro ocurre en vetas y sistemas de vetillas de cuarzo, ubicadas en zonas de dilatación a lo largo de superficies de fallas desarrolladas preferentemente en el gneis cuarzo feldespático.

Los estudios de inclusiones fluidas clasifican al yacimiento como mesotermal y las soluciones depositadas indican niveles de baja sulfurización.

Se colectaron un total de 47 muestras (Figura 7) de vetas en los tajos y en núcleos de barrenos de diamante. Las secciones pulidas para el estudio de inclusiones fluidas fueron preparadas con 24 muestras, la petrografía de las inclusiones muestran que todas son ricas en CO<sub>2</sub> y poca variación ocurre durante las etapas pre, intra y post mineral. Todas las inclusiones exhiben hábitos secundarios indeterminados, pero las texturas indican que fueron encerradas durante la cinemática de formación de vetas y reflejan ampliamente la composición de los fluidos hidrotermales que formaron las vetas.



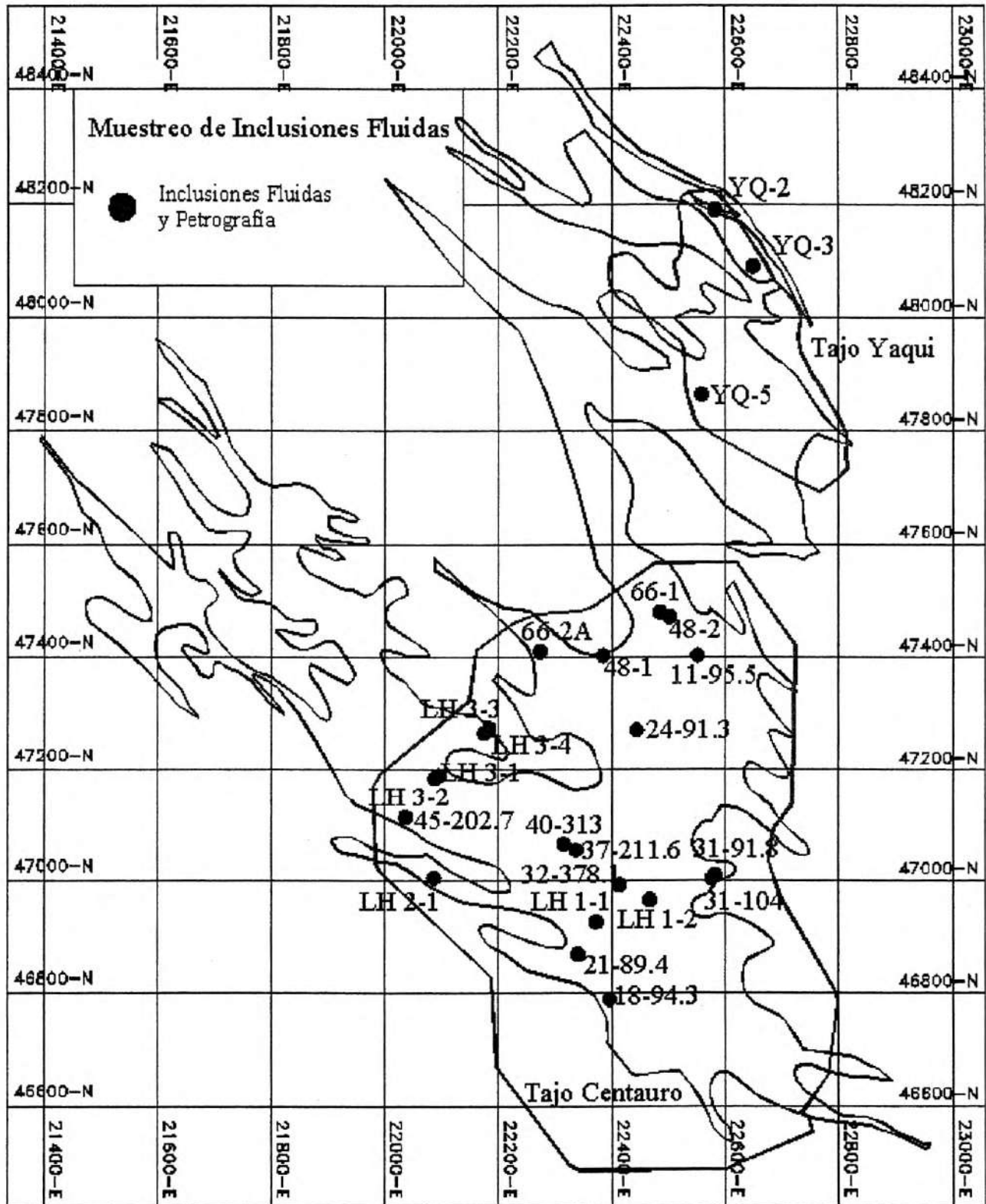


Figura 7.- Localización de muestras usadas para petrografía e Inclusiones Fluidas



Foto 1

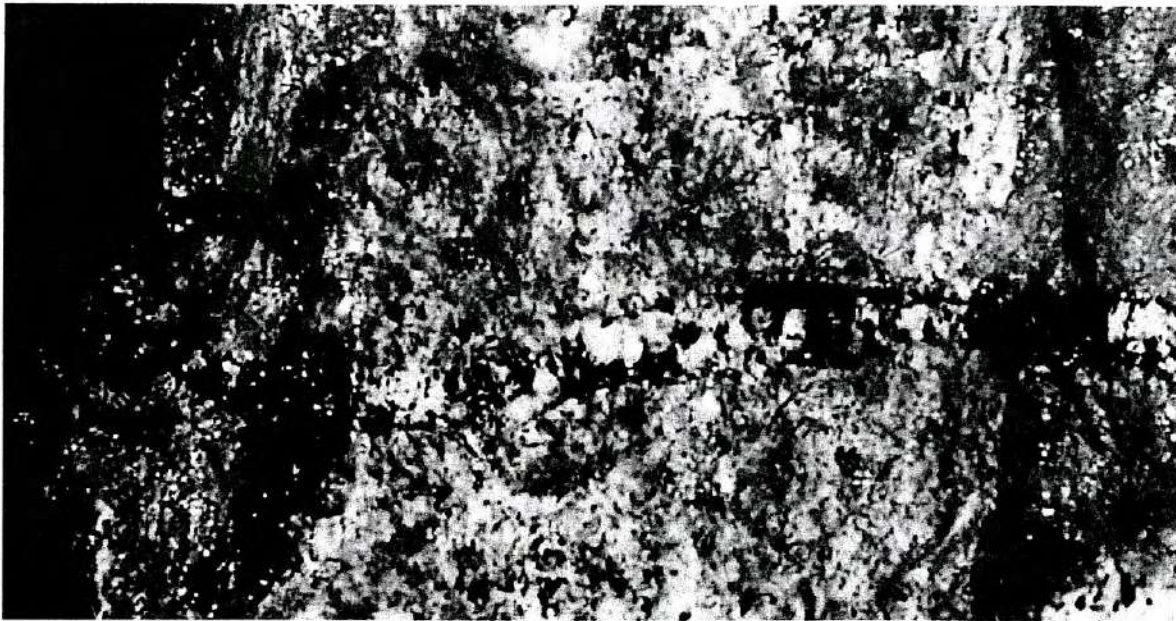


Foto 2

La Foto 1 muestra las vetas espaciadas que crecieron bajo tensión. Las vetas blancas, discontinuas de la incisión son visibles en el centro superior. Estas vetas se relacionan con las grandes vetas de los escarpes que se formaron a lo largo de las fallas inversas (Caddey, 2002). La Foto 2 inferior demuestra una veta típica extensional, con abundante goethita y hematita.



Foto 3

En la Foto 3 se muestra la presencia de vetas con cristales euhedrales de cuarzo, que eran las más probables para la identificación de inclusiones fluidas primarias. A pesar de la abundancia de cuarzo euhedral, no se encontró ninguna inclusión fluida primaria definida durante la petrografía. Muestra BDD-31-91.8. Vista en sección polarizada.

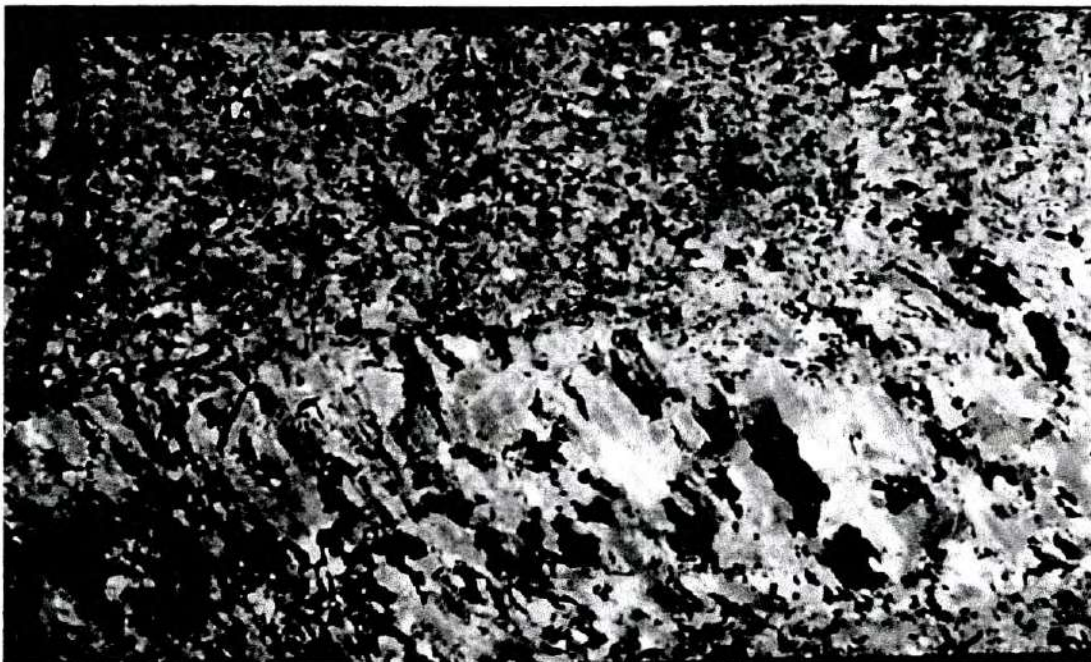


Foto 4

En la Foto 4 se puede notar que muchas vetas contienen cristales de cuarzo fibroso que crecieron en las paredes de las vetas de alto ángulo, que indican el crecimiento bajo tensión. Este tipo de cuarzo no recibió inclusiones usuables. Este tipo de cuarzo fue hospedado en el gneis cuarzo feldespático. Muestra LH-3-1, Tomada en el Tajo Centauro, sección polarizada.

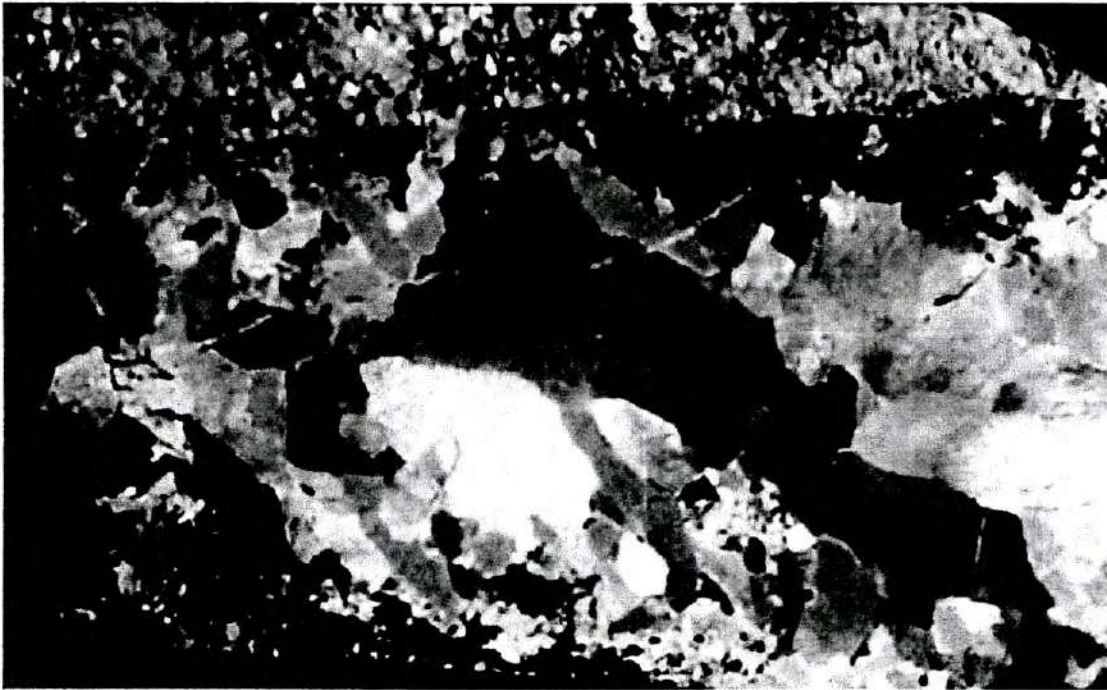


Foto 5

Algunas vetillas tenían orillas con óxido de Fe, y pueden pertenecer a la etapa pre-mineral de las vetas. Estas vetillas son raras en este arreglo y contienen inclusiones petrográficamente idénticas a las vetas definidas como syn-mineral. Muestras BDD-45-202.7; sección polarizada. (Foto 5)

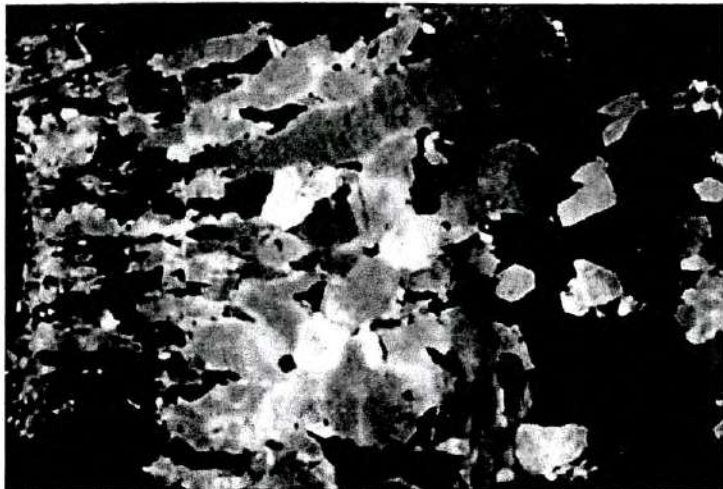


Foto 6a

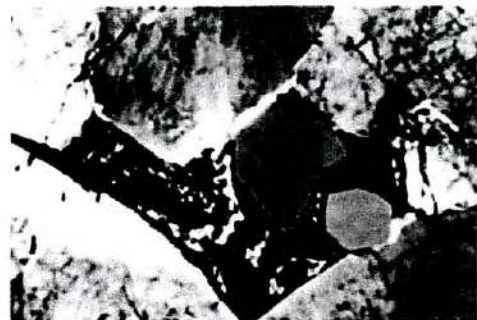


Foto 6b

La Foto 6a muestra vetas que contienen cantidades de goethita, hematita y calcita en menor importancia y en la mayoría de los casos no está deformado y relleno el último espacio abierto entre los cristales del cuarzo en los centros de las vetas. El cuarzo en estas vetas es syn-mineral y contiene inclusiones fluidas idénticas a las vetas syn-mineral sin contenido de óxidos-Fe - calcita. Muestra LH-66-2, sección polarizada. La Foto 6b muestra los vacíos intersticiales del cuarzo deformado cerca del cuarzo no deformado (granos azules), el carbonato (granos blancos pequeños) y la goethita (negro). Muestra BDD-24-91.3, sección polarizada, campo visual 5 mm.

Las vetas auríferas de cuarzo se formaron con las siguientes características:

- La mayoría son fluidos líquidos con poco vapor.
- La composición es de H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> (mol de 7 a 1% de CO<sub>2</sub>).
- Fase casi pura de CO<sub>2</sub>.
- Homogenización entre 260° y 295°C.
- Salinidades bajas entre 1.4 y 8.5% en peso equivalente de NaCl.
- NaCl solamente como componente de sal.
- Presiones de intercepción entre 1.15 y 1.45 Kbar o posiblemente hasta 2.2 Kbar (3.5 a 6.5 kilómetros de paleo profundidad).

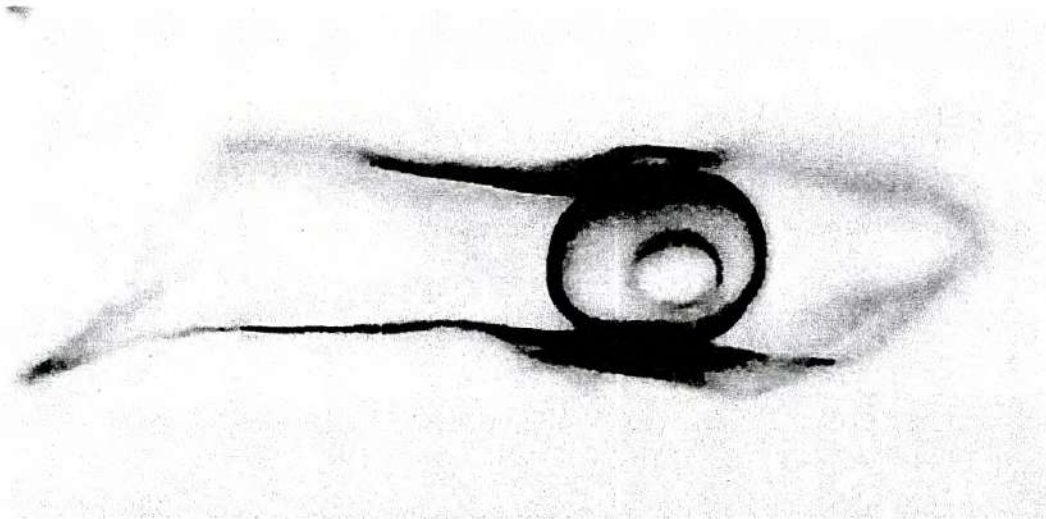


Foto 7

Ejemplo de inclusiones fluidas típicas en todas las muestras (Foto 7). La inclusión contiene un líquido acuoso, y líquido de CO<sub>2</sub> (la parte más oscura de la burbuja), y vapor de CO<sub>2</sub> (burbuja interna). Muestra BDD-21-89.4; la inclusión tiene 80 micrones de largo.

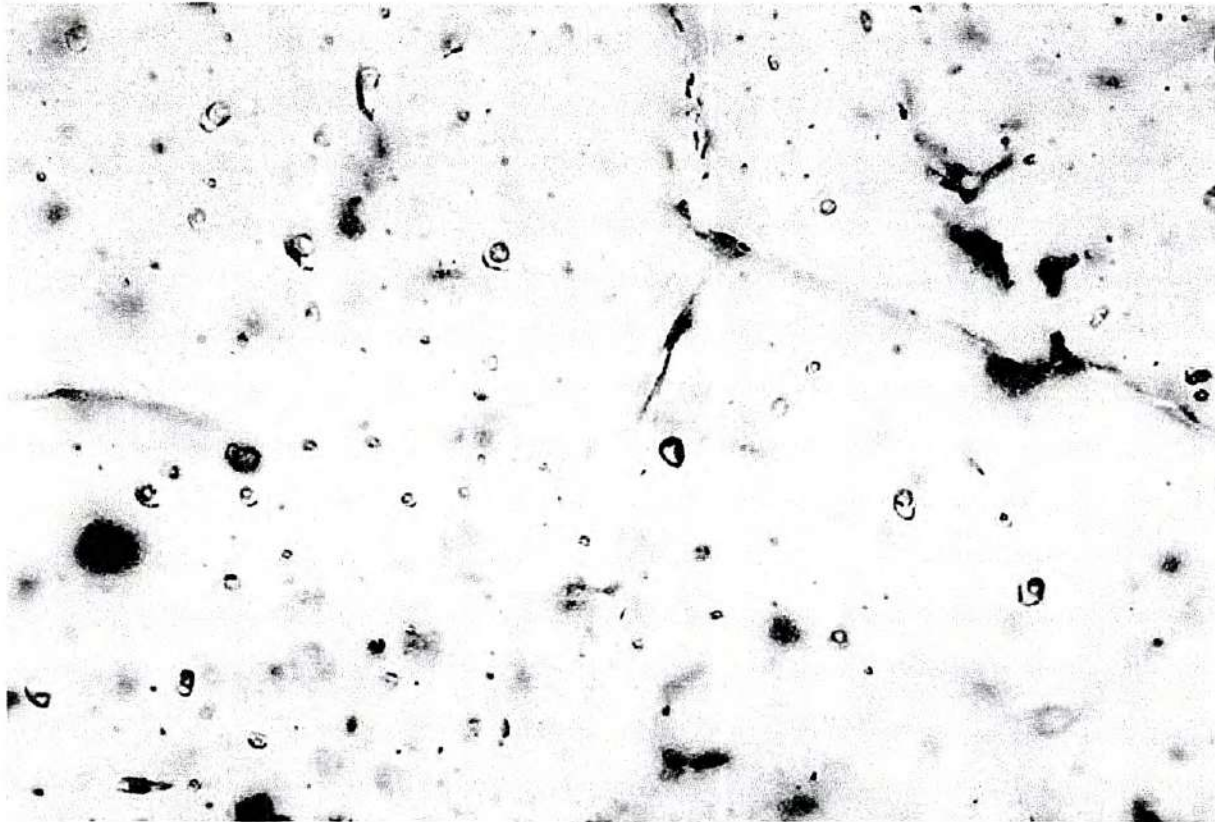


Foto 8

Las inclusiones son muy abundantes en grandes partes de cada muestra (Foto 8). Tienen típicamente una distribución regular sin control por fracturas (según lo mostrado arriba) o se encuentran en los planos de fractura (véase Foto siguiente pagina). Las inclusiones mostradas arriba tienen cocientes muy constantes de vapor a líquido, sugiriendo que la modificación de la post-atrapamiento no ha sido significativa. Algunas inclusiones ricas en vapor están también presentes (inclusiones casi negras en el centro y la parte izquierda central). Muestra LH-48-2, campo visual 0,6 mm.

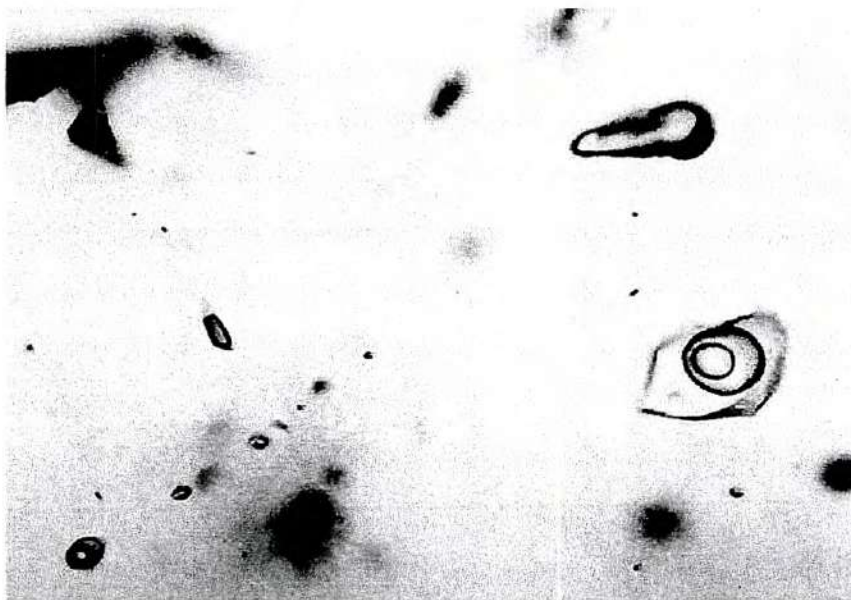


Foto 9a

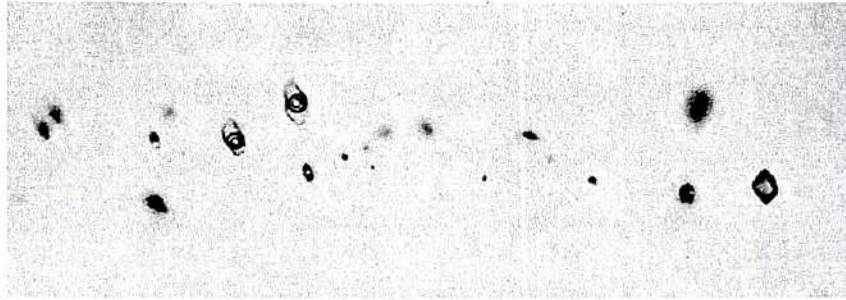


Foto 9b

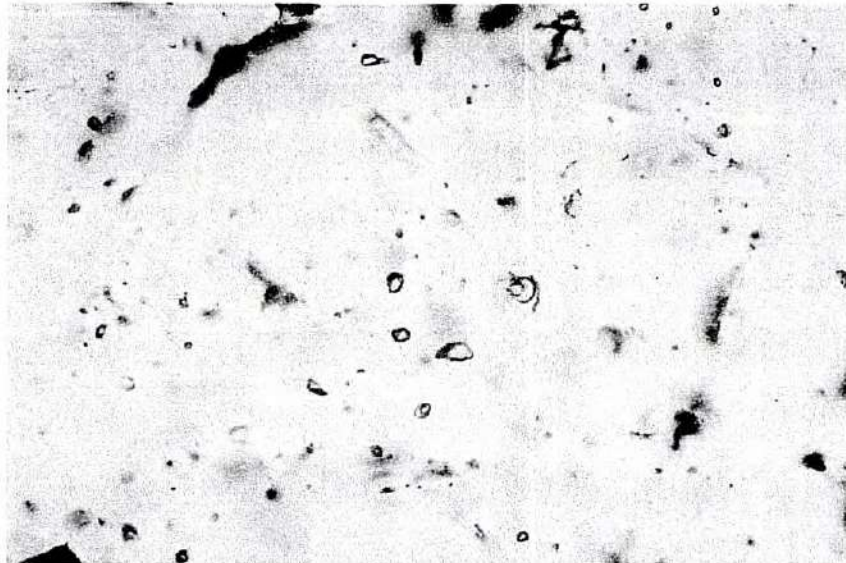


Foto 9c

Inclusiones con líquido rico en  $\text{CO}_2$ , (más ligera que las burbujas visibles) coexisten comúnmente con las inclusiones ricas en vapor de  $\text{CO}_2$  (oscuras). Esto sugiere una coexistencia de dos tipos de fluidos a través del depósito durante la formación y la mineralización de las veta. En muchos casos, las inclusiones ricas en Vapor pueden coexistir preferencialmente que las inclusiones de burbujas ricas en Líquido de  $\text{CO}_2$  y tengan un cociente comparativamente bajo de V/L. La Foto 9a, muestra LH-1-2, campo visual 0.3 mm; La Foto 9b muestra LH-2-1, luz plana, campo visual 0.3 mm; La Foto 9c muestra LH-1-2, luz plana, visión 0.6 mm.

Comparándolo con otros depósitos (Tabla 6), los fluidos de La Herradura se formaron con temperaturas y salinidades similares a los depósitos de San Francisco y La Colorada, pero con presiones levemente más altas, debido a una mayor paleo profundidad. Los fluidos en Mesquite y otros depósitos de California se formaron a una temperatura y presión más baja, pero la salinidad de los fluidos es similar. Todos los grandes depósitos de oro contienen fluidos con concentraciones significativas de  $\text{CO}_2$ , pero la mayoría de los depósitos contienen fluidos acuosos con temperaturas más bajas que no fueron encontradas en La Herradura.

**Tabla 6.- Comparación con otros Depósitos**

Deposito	Temp °C	Salinidad wt% NaCl	CO <sub>2</sub>	Profundidad	Fuente
La Colorada	263-354	<26 y >26	No	> 1.4 kbar	Zawada (1998); Fenocristales Igneos
La Colorada	270-370	38-43	Localmente	1.1 kbar	Zawada et al., (2001) Fenocristales de Riolita
La Colorada	280-320	1.2-5.5	No	1 km hidrostático	Zawada (1998); vetas de Au
La Colorada	138-228	3-11.8	No		Zawada et al., (2001); relación de Au
San Francisco	250-300	??	Si		Pérez et al., (1996)
San Francisco	150-180	~10	No		Pérez et al., (1996)
Compilación de Varios depósitos	218-336	2.0-11.4	15 mol%	1.5-4 km	Albinson (1989); Depósitos El Tiro, Chanate, San Felipe
Mesquite	215-230	Bajo	Moderado	< 1km	Manske et al., (1987)
American Girl & Madre y Padre	200-250	Bajo	Alto		Guthrie et al., (1987)
AZ/CA	250-300	Dic-20	No	< 1 km	Wilkins et al., (1986)
Picacho	201-226	0.5-0.7	No	< 1 km	Drobeck et al., (1986)
<b>La Herradura</b>	<b>260-295</b>	<b>Si</b>	<b>Si</b>	<b>3.5-6.5 km</b>	<b>Este Estudio</b>

La Herradura demuestra que tiene características que pueden compararse con otros depósitos económicos de oro en la región. Sin embargo, representa un ambiente hidrotermal más profundo y más constantemente enriquecido por CO<sub>2</sub>. esto puede explicar su mayor tamaño comparado con otros depósitos.

## 5.- Geología de Mina y Métodos de Exploración

### 5.1.- Geología de Mina y Apoyo a la Exploración

En la Mina La Herradura se han estandarizado los trabajos de mapas geológicos en las frentes de rezagado en todos los bancos de los tajos Centauro y Yaquí, esto nos permite obtener una geología a detalle de cada banco ya que los datos geológicos están tomados de 20 a 40 metros para interpretar las plantas geológicas de todos los bancos que se han minado. Esto nos ha servido para tener un mejor control de fallas importantes,



zonas de mineral, material estéril y la intensidad de fracturamiento presente en el tajo. A su vez, esta información es básica para actualizar y reinterpretar el modelo geológico mediante un sistema de plantas cada 8 metros y secciones transversales cada 25m. (Figura 8).

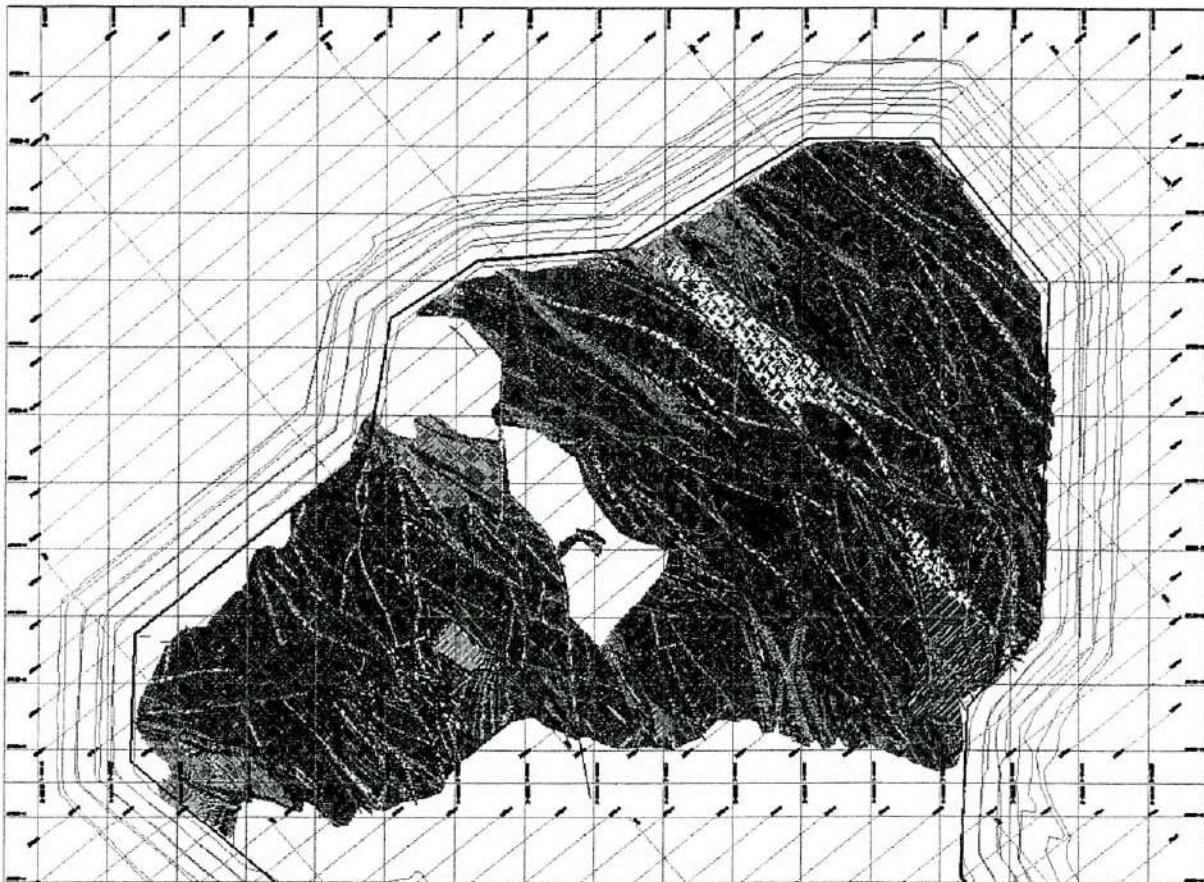


Figura 8.- Mapeo Geológico de Bancos

Un modelo geológico es también utilizado para generar un modelo de bloques que permite la estimación de reservas y recursos de mineral, tal como se muestra en la Figura 9. El modelo geológico nos ayuda a elaborar programas de exploración y proyección de barrenos que nos permiten localizar y evaluar nuevos recursos minerales y es también una herramienta que nos apoya en el control de mineral durante el proceso de clasificación de los materiales en el rezagado.

En la Figura referida, las zonas rojas que se ven en el modelo geológico son envoltentes de mineral que son interpretados a partir de barrenos de voladuras y barrenos

de exploración; las zonas verdes corresponden al gneis y esquisto precámbricos; la azul son metasedimentos y el color café son grava y arena. Observando el modelo de bloques nos podemos dar cuenta que los cuerpos de mineral concuerdan exactamente con el modelo de bloques.

#### Tajo Centauro Banco 88



Modelo Geológico



Modelo Ley de Au

Figura 9.- Comparación del Modelo Geológico y el Modelo de Leyes

A partir de los mapeos geológicos de bancos se recolectaron datos estructurales que al complementarlos con el modelo geológico nos ayudan a diferenciar unidades geotécnicas (Figura 10) y crear modelos de este tipo que nos permite diseñar los ángulos de los taludes del tajo, evitar caídos y prevenir accidentes.

Esta información nos permite trabajar en un lugar con mayor seguridad y también para conocer las características de los macizos rocosos en las diferentes zonas del tajo y a su vez podemos diseñar obras permanentes y temporales. Podemos seleccionar el sistema de minado más adecuado para el tipo de material mineralizado que se va a

extraer y determinamos la magnitud y dirección de esfuerzos de pre minado mediante técnicas de liberación de esfuerzos.

Este tipo de modelos geotécnicos también nos ayuda a controlar el daño a la roca provocado por las voladuras de producción y avance por medio de post-corte o voladura suavizada. Implementamos cuando es necesario mejoras a los procesos de barrenación, cargado de explosivos, secuencia de disparo y fragmentación de la roca en los bancos que es de vital importancia para la buena recuperación de Au en los patios de lixiviación.

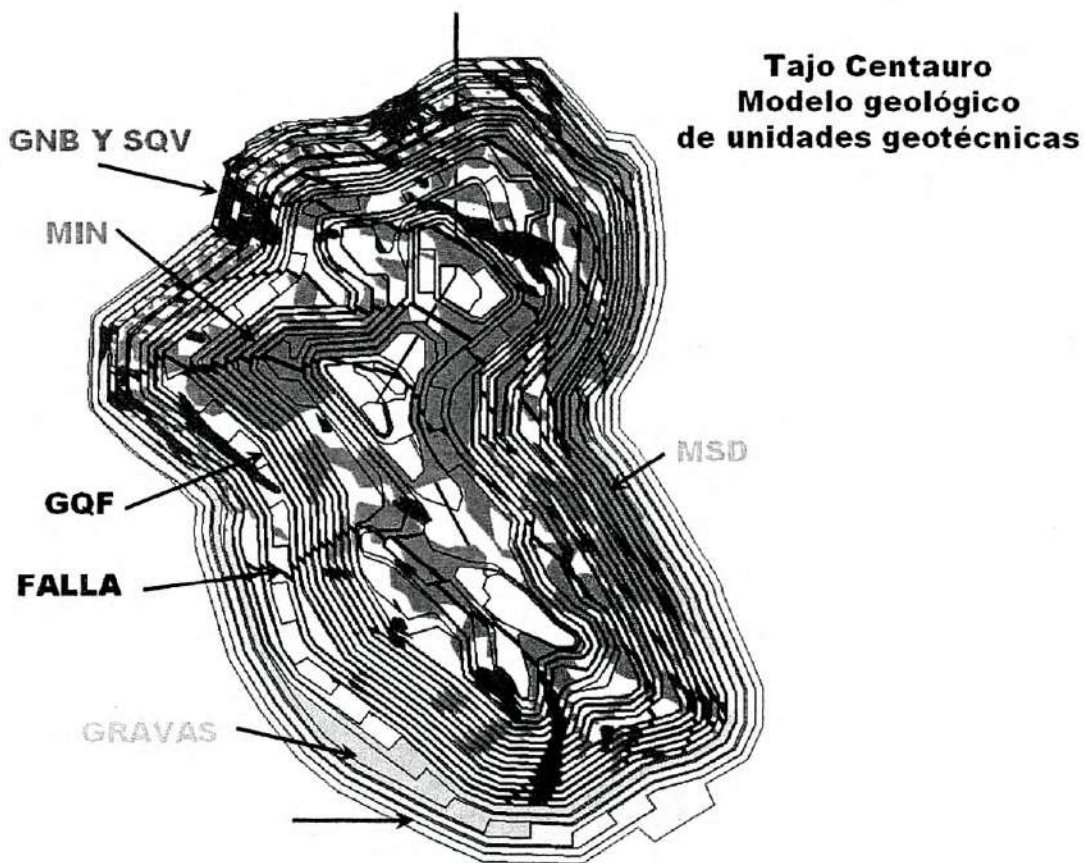


Figura 10.- Geología de Banquetas

Los objetivos de exploración son considerados como "Zonas potenciales de generación de recursos de mineral"; para localizarlos se utilizaron métodos indirectos y directos de exploración.

Las fotografías aéreas e imágenes de satélite son herramientas valiosas para mejorar un buen modelo estructural más allá de la zona de influencia de las áreas de producción, que apoyado con métodos indirectos como la Geofísica, nos permitirá determinar áreas potenciales de contener depósitos semejantes a los que estamos minando. Estos objetivos son soportados con Geoquímica de Iones Metálicos Móviles (MMI) y Geología Estructural.

En los blancos mas importantes se programan barrenos para comprobar la presencia de cuerpos mineralizados que con campañas futuras de barrenación nos llevaría al descubrimiento de nuevas áreas minables en el corredor precámbrico de La Herradura, el posible potencial es evidenciado por la continuación de rocas precámbricas y el dominio sedimentario paleozoico en la margen W.

## **5.2.- Métodos Geofísicos de Exploración.**

Los métodos geofísicos que se han utilizado en la exploración del depósito han sido la gravimetría y magnetometría; primeramente el objetivo de usar esta técnica fue conocer la respuesta de los métodos en el yacimiento y poder darle uso en la exploración regional para localizar blancos potenciales.

Los trabajos geofísicos realizados fueron:

- Magnetometría Aérea (Reducción al polo).
- Gravimetría (Anomalía de Bouguer Corregida).

Mediante estos métodos ha sido posible ubicar la continuidad del corredor precámbrico local y el espesor de la cubierta de aluvión.

### **5.2.1. Magnetometría.**

Con base a la geología del distrito y la interpretación de planos con magnetometría se ha determinado que con esta técnica es factible ubicar las unidades litológicas presentes en el distrito.

En base al análisis realizado es muy evidente la anomalía correspondiente a una franja de esquistos que representa el contacto entre el gneis precámbrico al oriente del yacimiento y la caliza del Paleozoico Tardío. Esta anomalía representa la Falla Ocotillo. La firma magnética (Bajo magnético), que presenta el plano de reducción al polo (Magnetometría Aérea) (Ver Plano 1) en la zona mineralizada del tajo Centauro se repite en las zonas a explorar al NW y SE del tajo.

Es importante contar con el plano de reducción al polo basado en datos de magnetometría terrestre y sus perfiles respectivos, correlacionarlos con secciones geológicas de la mina y tener bases mas firmes para ubicar blancos mas precisos.

### **5.2.2. Gravimetría.**

Debido a la diferencia de densidad de las unidades litológicas con respecto al paquete de aluvión que está rellenando las superficies con afloramientos someros y cuencas profundas (> a 50 metros), concluimos que es muy importante generar modelos gravimétricos de la estimación de densidad con el objetivo de ubicar el macizo rocoso cubierto por espesores de aluvión menores a los 100 metros; sí contienen cuerpos mineralizados y que podrán ser viables de ser minados mediante tajos a cielo abierto. Esta información es muy importante para la zona SE del tajo Centauro.

Los perfiles gravimétricos y magnéticos reflejan la Falla Ocotillo; a partir de esto se pudo visualizar la misma estructura en el plano de anomalía de Bouguer corregida (Ver

Plano 2), también es muy evidente en la planta la ubicación de las cuencas hidrológicas de la región.

La firma gravimétrica en el depósito del Tajo Centauro está representada por curvas desordenadas, se pueden observar primeramente una a 4.5 km con rumbo N10°W la cual coincide con la anomalía del plano de Reducción al polo (magnetometría aérea) (Ver Plano 1), y una segunda a 5.5 km. al N85°W.

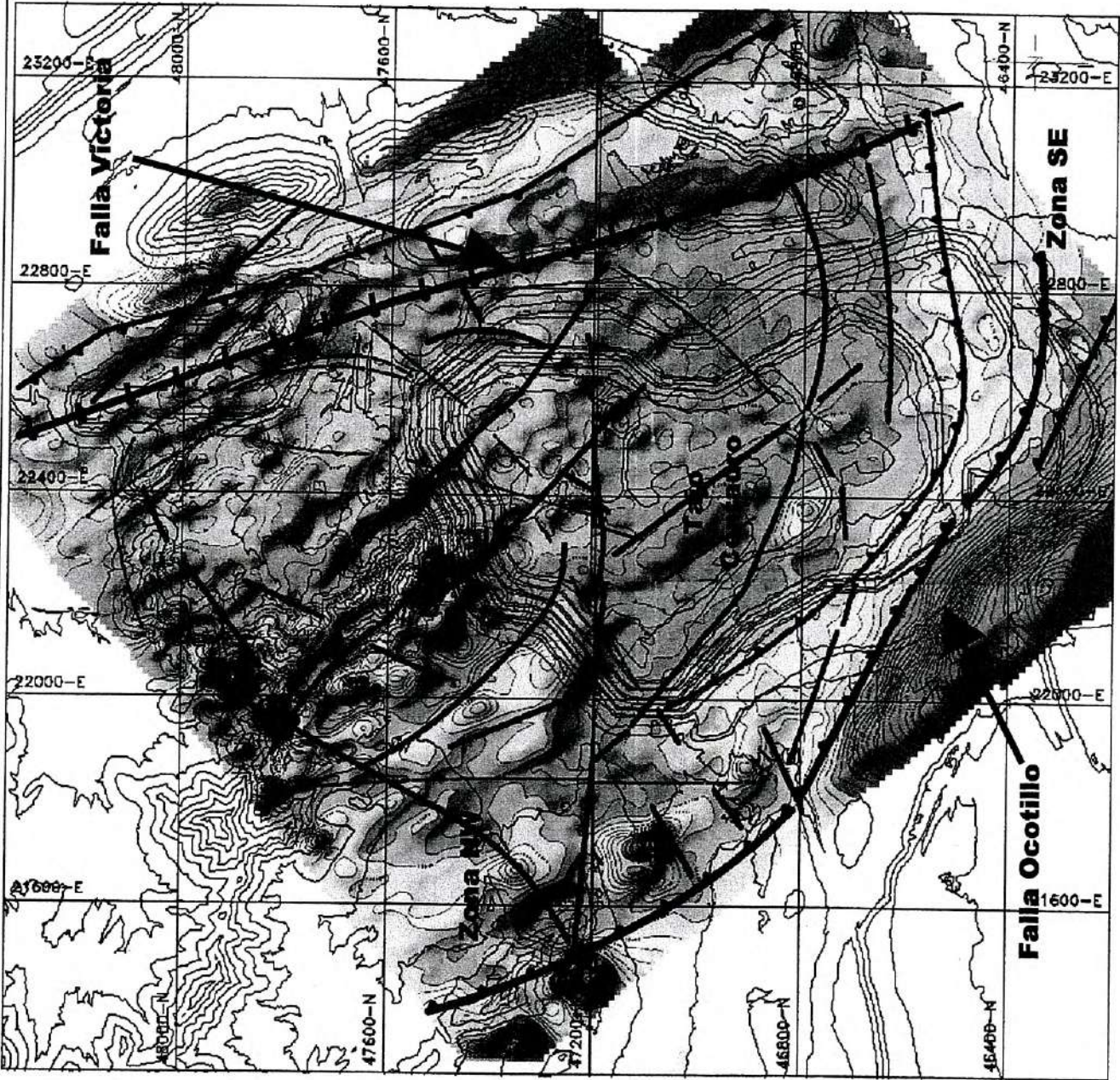
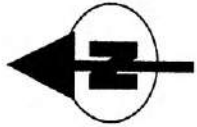
### **5.2.3. Objetivos de Exploración.**

#### **Zona NW**

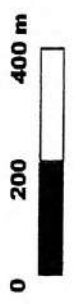
Estos objetivos se ubican aproximadamente a 2 km del extremo NW del tajo Centauro y la exploración está dirigida a la localización de cuerpos con mineralización económica y en definir la continuidad del corredor; esta zona puede contener un potencial de mineral que pueda ser incorporado. Aunado a esto, la confirmación de la continuidad de los cuerpos en la zona de Dunas, (Cuerpo 500), Centauro NW, (Cuerpo 800 y 1000 y NW del tajo Yaqui, (Tren Yaqui), para ello es importante comprobar la posibilidad que los cuerpos tienden continuar hacia esa zona, en estos blancos se están programando trabajos de exploración.

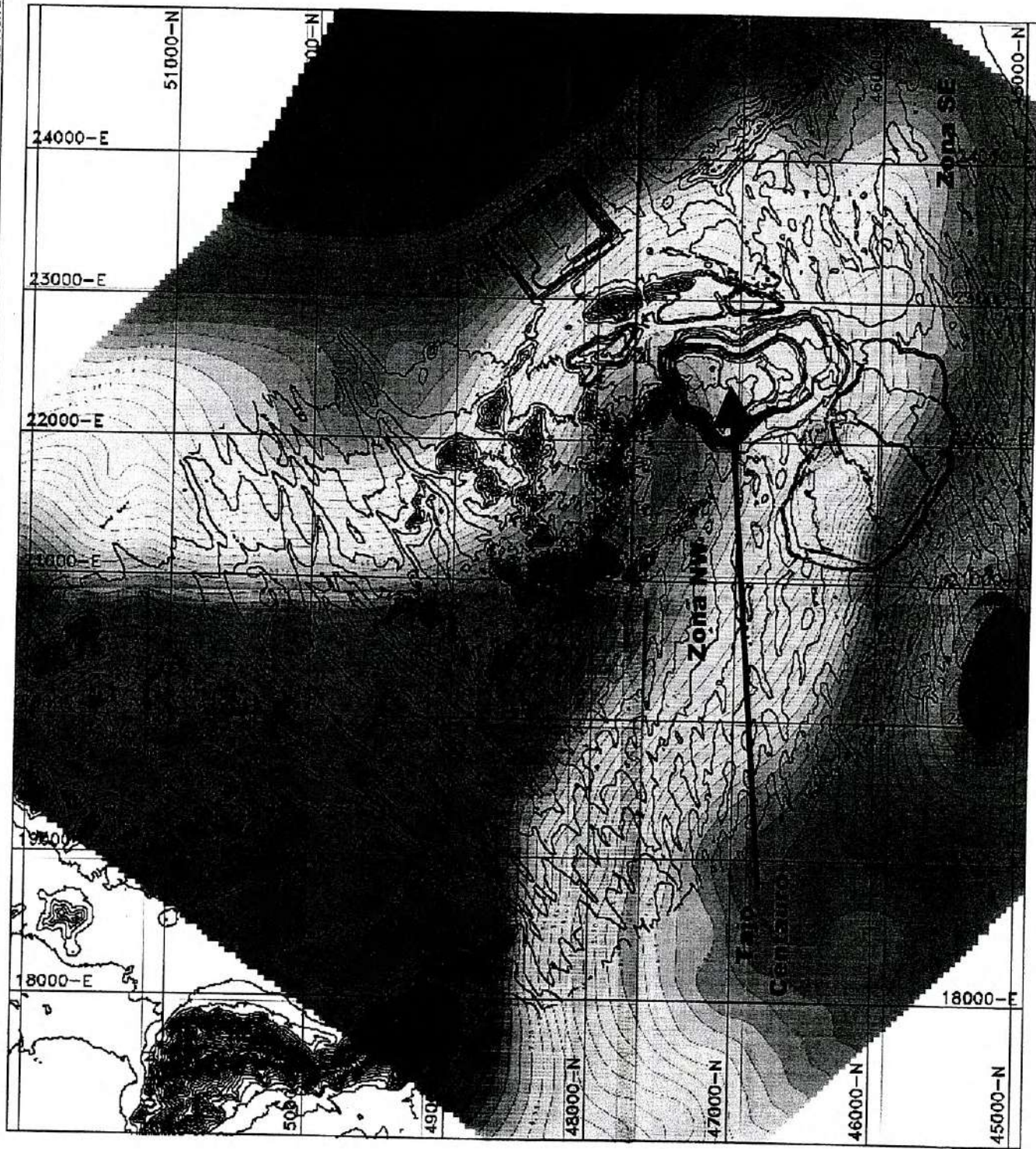
#### **Zona SE**

Este objetivo se ubica en el extremo SE del tajo Centauro y la exploración está dirigida a la continuidad de los cuerpos 700 y 500, cabe mencionar que la exploración con BCI 2001-2002 confirma la continuidad de los cuerpos hacia esa zona, además de la posible manifestación de una anomalía baja detectada por MMI al extremo SE de la Unidad, la cual será explorada con una campaña de muestreo cerrado de MMI y dirigido hacia ese posible blanco por confirmar.



**PLANO 1**  
**REDUCCIÓN AL POLO**  
**MINA LA HERRADURA**





**PLANO 2**  
**ANOMALÍA DE BOUGUE**  
**MINA LA HERRADURA**



### **5.3.- Método Geoquímico de Exploración (Geoquímica de Iones Metálicos Móviles)**

#### **MMI.**

Tratando de implementar nuevos métodos de exploración se realizó un muestreo geoquímico de MMI en la mina La Herradura con el objetivo de probar el método en el yacimiento, tomando un total de 564 muestras. Esta prueba reflejó una anomalía que corresponde a los cuerpos mineralizados conocidos como Dunas y Yaqui NW. Después de esta prueba se hizo un programa para aplicar esta técnica en las cercanías de los cuerpos mineralizados en explotación y ser utilizados como guía de exploración en áreas cubiertas por sedimentos.

Las muestras colectadas al NW y SE del tajo Centauro, cubrieron un área de 40 km<sup>2</sup> aprox., todas las muestras se colectaron a lo largo de la interpretación del corredor precámbrico por ser este una guía importante en la exploración del yacimiento.

El muestreo fue ubicado en una retícula de 200 X 100m, las líneas se definen cada 200m con una orientación de N50°W coincidentes con el sistema de secciones geológicas perpendiculares al tren de los cuerpos mineralizados y los muestreos sobre líneas establecidas a cada 100m.

Las muestras fueron recolectadas a una profundidad de 40cm con un peso de 200 a 250 gr haciendo una descripción del tipo de material para cada punto de muestreo. Finalmente la importancia de la descripción radica en diferenciar las muestras que son de dunas y de las que no son; para definir estos dos tipos de material se manejaron dos clasificaciones: Dunas y Suelo Consolidado.

Con base al mineral que explotamos y a la población de datos ubicados en el área de estudio se contempló que el Au y la Ag son elementos que mejor respuesta dan y a su vez marcarían las zonas de cuerpos mineralizados conocidos como anomalías de envoltentes, estas anomalías serían identificadas a partir de tener rangos de 0.05 ppb de

Au y 5 ppb de Ag, o con valores que resulten con un coeficiente de respuesta superior a 10 (10 veces el background o valor de fondo). Por lo tanto la suite ensayada que se utilizó en este muestreo fue por metales preciosos (Digest\_B) que corresponde a Au, Ag, Co y Ni, contemplando para el análisis y procesamiento de datos únicamente los resultados de Au y Ag.

El principio básico de este método es el de analizar iones metálicos móviles que después de desprenderse de un posible cuerpo mineral, viajan relativamente hacia la superficie y se adhieren a las partículas de arcillas del suelo formando una película alrededor de la partícula sin integrarse a esta. Solo cuando la cantidad de iones de un mismo elemento se incrementa en demasía, estos precipitan integrándose a la partícula del suelo dejando su naturaleza iónica para convertirse en partículas metálicas del suelo.

Mediante extractores se logra que los iones adheridos al grano de arcilla se desprendan de esta y queden en solución en una base ácida; la fracción sólida de la muestra (el suelo), se desecha y solo entra a ensaye el material iónico que está en solución. Por la cantidad tan pequeña de iones disponibles en cada muestra, los ensayos son de muy bajo límite de detección y se expresan en partes por billón (ppb).

Los valores mínimos de detección dados por el laboratorio SGS fueron para el Au y Ag de 0.10 ppb, aquellos valores con resultados menores al límite de detección se les asignó como dato 0.05 ppb que es la mitad del valor mínimo de detección.

Los iones son capaces de migrar a través de cualquier tipo de roca y/o suelo que se ubique por encima de un cuerpo mineralizado sin importar la génesis de este, reflejando en superficie la ubicación de cuerpos de mineral y/o discontinuidades por las que viajan más fácil. Los iones metálicos se adhieren por igual a las partículas de suelo residual, coarvial o aluvial.

La naturaleza arenosa del suelo en el área de estudio se debe al régimen de erosión mecánica por efecto de los cambios bruscos de temperatura y el viento. Las arenas parecen tener poco transporte evidenciado por la presencia de especies vegetales.

Se hizo una base de datos a partir de los resultados con todas las muestras, se procesaron los datos para obtener estadística básica e histogramas con el fin de conocer el comportamiento de la población y obtener el valor de fondo o background para el Au y Ag.

El procesamiento estadístico de los datos se realizó para tres poblaciones:

- |                                       |              |
|---------------------------------------|--------------|
| 1) Población Total                    | 564 muestras |
| 2) Población Dunas                    | 391 muestras |
| 3) Población Diferente a Duna (Suelo) | 173 muestras |

Con base al análisis estadístico el background o valor de fondo se calculó para cada tipo de material (Duna y No Duna) teniendo como resultado los siguientes: (Tabla 7)

**Tabla 7.- Valores de Fondo (Background)**

Tipo de Suelo	Au (ppb)	Ag (ppb)
Duna	0.08	1.92
Suelo	0.59	7.33

El background se obtiene mediante histogramas que incluyen la gráfica de porcentaje acumulado. Se buscan los quiebres en la gráfica que define el histograma los cuales indican el límite entre poblaciones, se utiliza la media de la población que está entre 20 y 40% del gráfico del porcentaje acumulado. Otra opción más simple es usar el último dato del primer cuartil de la población.

El background se utiliza para obtener el Cociente de Respuesta (CR), al dividir el resultado del elemento de cada muestra entre el background respectivamente. El cociente de respuesta indica o representa la cantidad de veces que el valor del elemento en ppb rebasa el background.

Los resultados de los elementos y cocientes de respuesta se interpolan en el Software Surfer para mostrar el comportamiento de los datos en un plano con el fin de identificar áreas anómalas o de valores relativamente altos con respecto a la población.

De esta forma se identifican las anomalías por su magnitud, extensión y distribución, posteriormente se comparan con planos geológicos y estructurales para asociarlo a posibles cuerpos y/o estructuras mineralizadas.

Los datos fueron interpolados en Surfer mediante el kriging el cual fue procesado con radios de búsqueda de 425 metros paralelos al azimut de  $-50^{\circ}$  y 265 metros con sentido perpendicular, estos rangos fueron definidos con base a la distribución espacial de la información. (Figura 11).

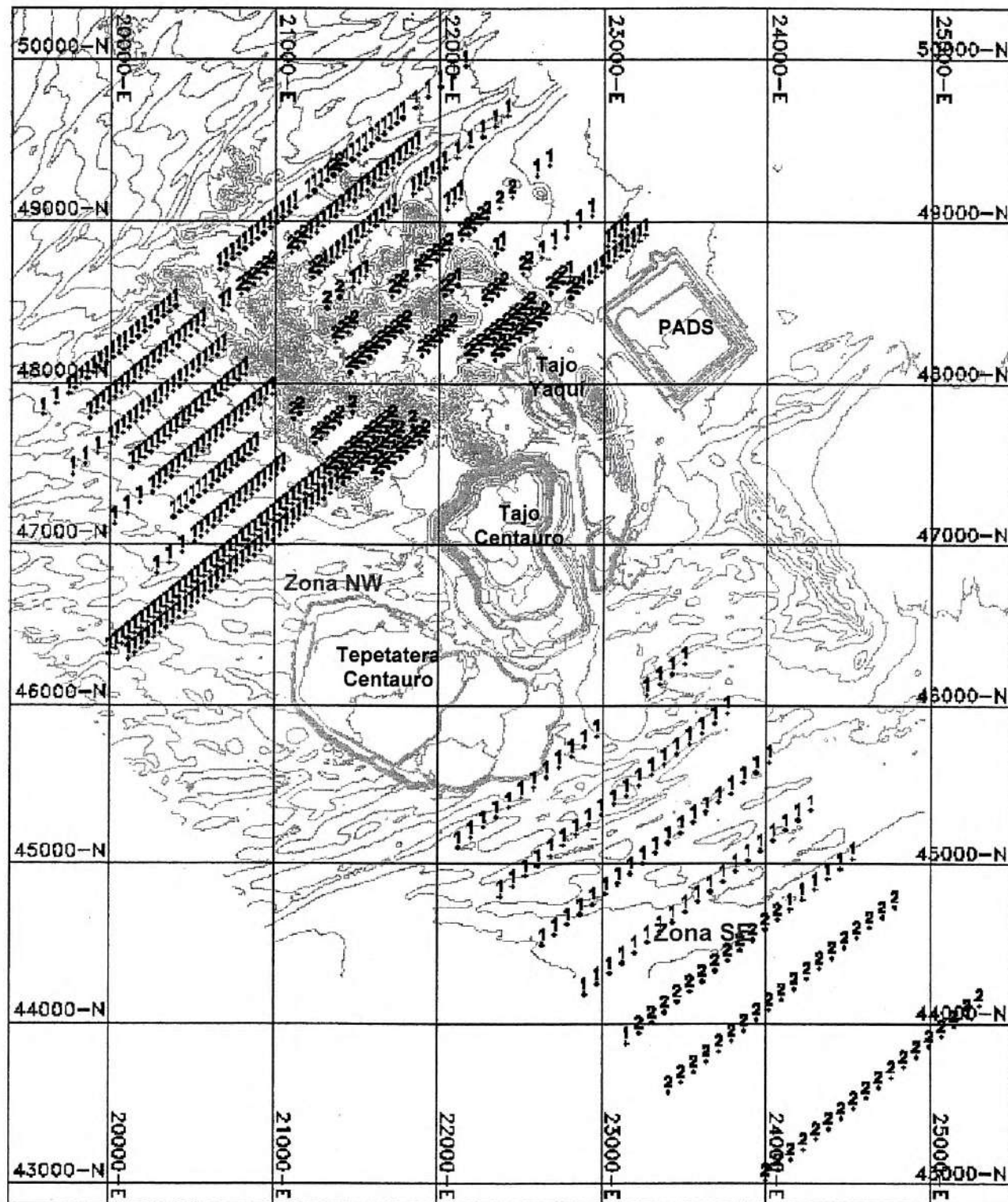


Figura 11.- Distribución de Muestreo MMI (Plano Base)

Planos de configuración Au y Ag mostrando a la izquierda el elemento en ppb y a la derecha el Cociente de Respuesta. (Figura 12a, 12b, 13a, 13b).

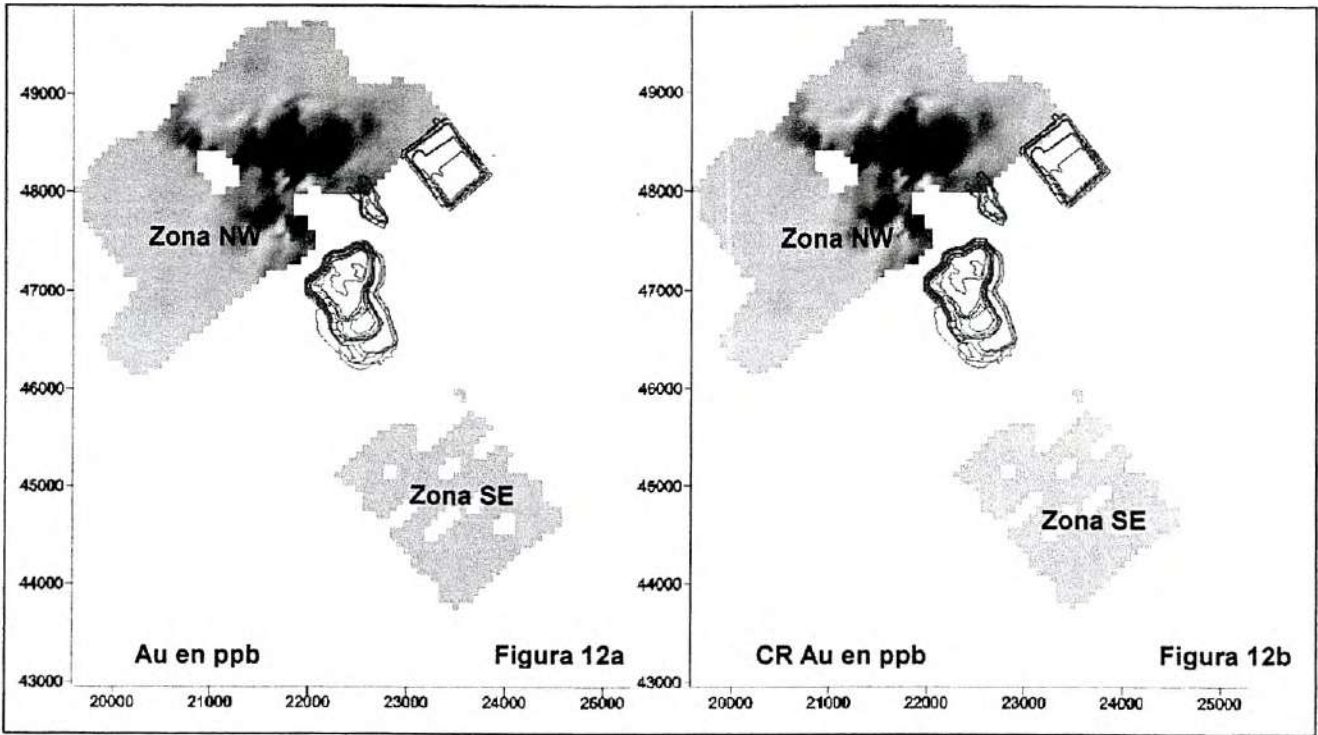


Figura 12a y Figura 2b.- Respuesta del MMI para Au

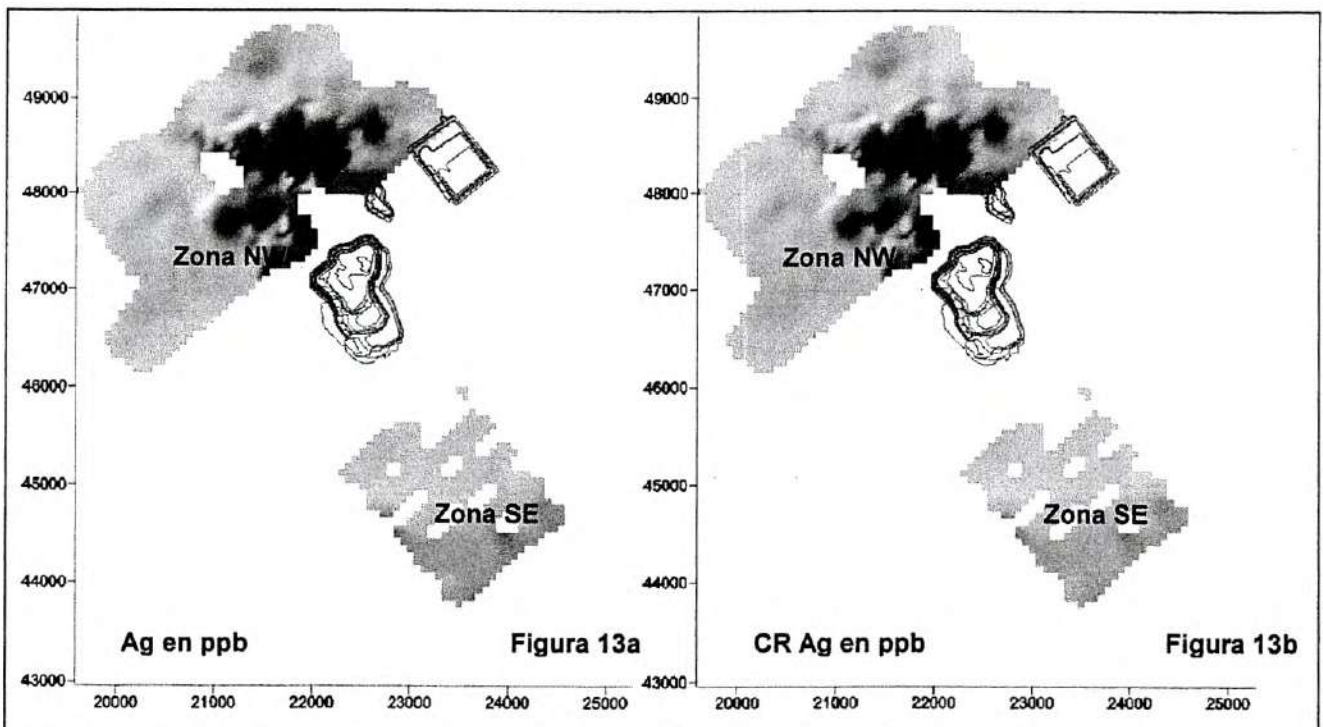


Figura 13a y Figura 13b.- Respuesta del MMI para Ag

La configuración de Au y Ag en sus valores normales en ppb y de cocientes de respuesta son muy similares por lo tanto una combinación de los cocientes de respuesta Au + Ag debe ser representativa del método y evidenciar las anomalías más importantes siempre y cuando estén por encima de 15 veces el background tal como se muestra en la siguiente figura. (Figura 14).

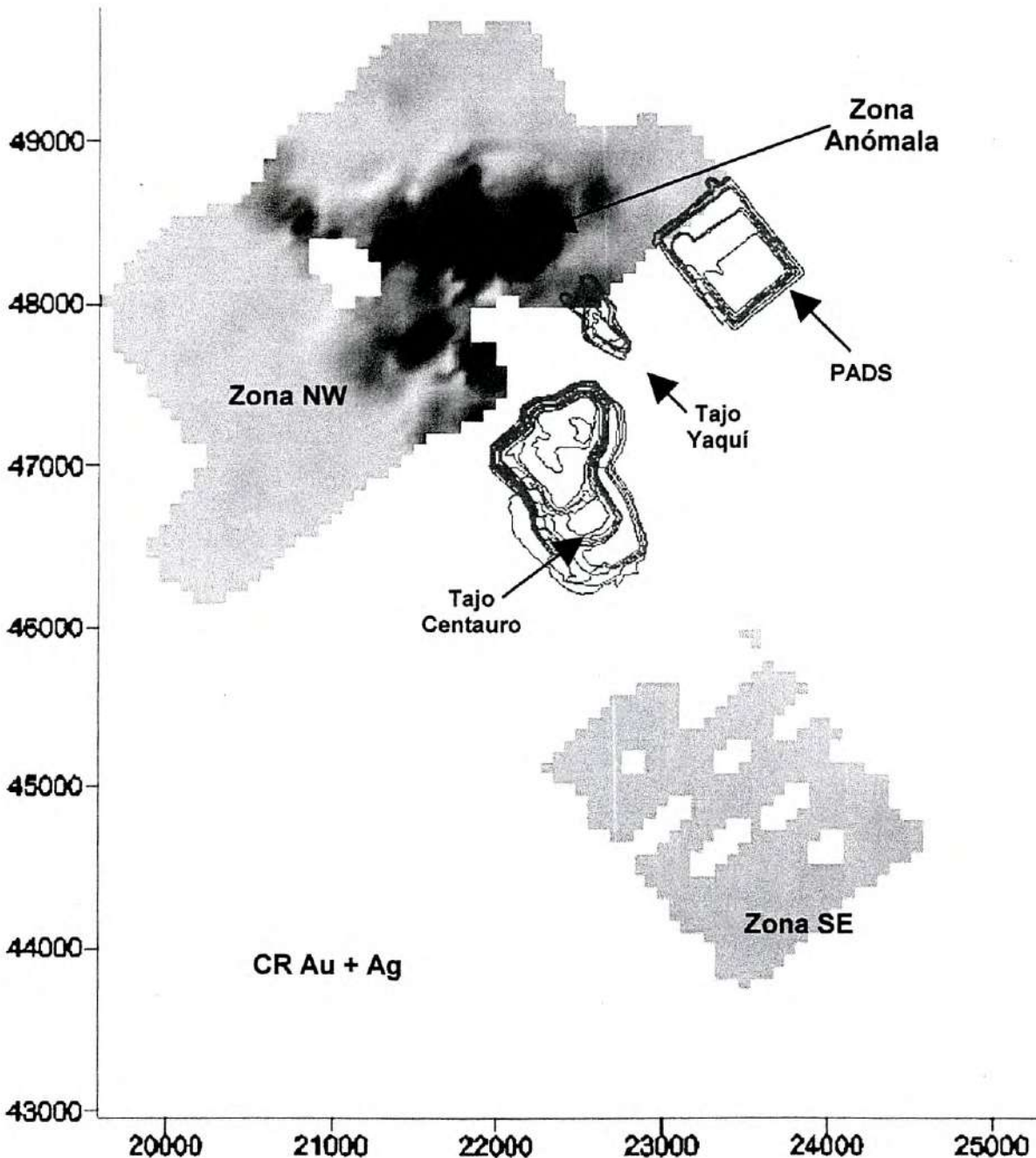


Figura 14.- Plano Geoquímico de MMI interpolando Cocientes de Respuesta Au + Ag

**Zona NW:**

Corresponde a los muestreos localizados en los valles inmediatos al NW del los tajos Centauro y Yaquí, esta anomalía es la mas grande y de magnitud superior a los 30 background y se correlaciona con la continuidad de los cuerpos mineralizados en los tajos. Los espesores de sedimentos que cubren al macizo rocoso se estiman entre 10 y 30 metros de espesor.

La zona de valles (Valle Dunas, Valle 10 de Mayo y Valle NW), fue documentado con mapeo estructural del distrito e interpretación gráfica de los afloramientos favorables del gneis cuarzo feldespático que forman un patrón en forma de herradura. Numerosas zonas con fallas de cabalgadura inversa con rumbo N50°W y buzando al norte cruzan unidades favorables de roca, las vetas y vetillas de cuarzo goethita son abundantes y contienen Au anómalo (se considera Au anómalo a los muestreos con contenidos de Au igual ó mayor a 0.1 gr/ton). Esta zona de anomalía se ubica a lo largo del tren Centauro-Yaquí. La parte de la anomalía de la zona de cizalla Victoria, de acuerdo al modelo de mineralización en el tajo Centauro, es el conducto alimentador de los cuerpos de mineral.

**Zona SE:**

Este objetivo se ubica aproximadamente a 6 kilómetros al SE del tajo Centauro y en el cual no se encontraron anomalías por este método de MMI pero comprobándolo con la geofísica nos podemos dar cuenta que estamos dentro de una cuenca y posiblemente por el mismo motivo los iones de Au no pudieron emigrar hasta la superficie debido a la profundidad de la roca.

Pero aun así, esta área cobra importancia debido a (1) La posible ubicación dentro del tren de rocas precámbricas favorables, (2) el área presenta una anomalía magnética negativa similar a la de Centauro y que probablemente refleja la destrucción de magnetita



primaria por efecto de la mineralización en el paquete de gneis y esquistos como se indica en la petrografía; por lo que es posible que esta zona sea favorable, (3) los estudios de geofísica por el método gravimétrico indican que el área de anomalía no está dentro de las grandes cuencas profundas (con relleno de sedimento alrededor de 200 metros), aledañas a los afloramientos, (4) geoméricamente en este objetivo podría existir una zona de dilatación como la inferida en los tajos del depósito. (Figura 15).

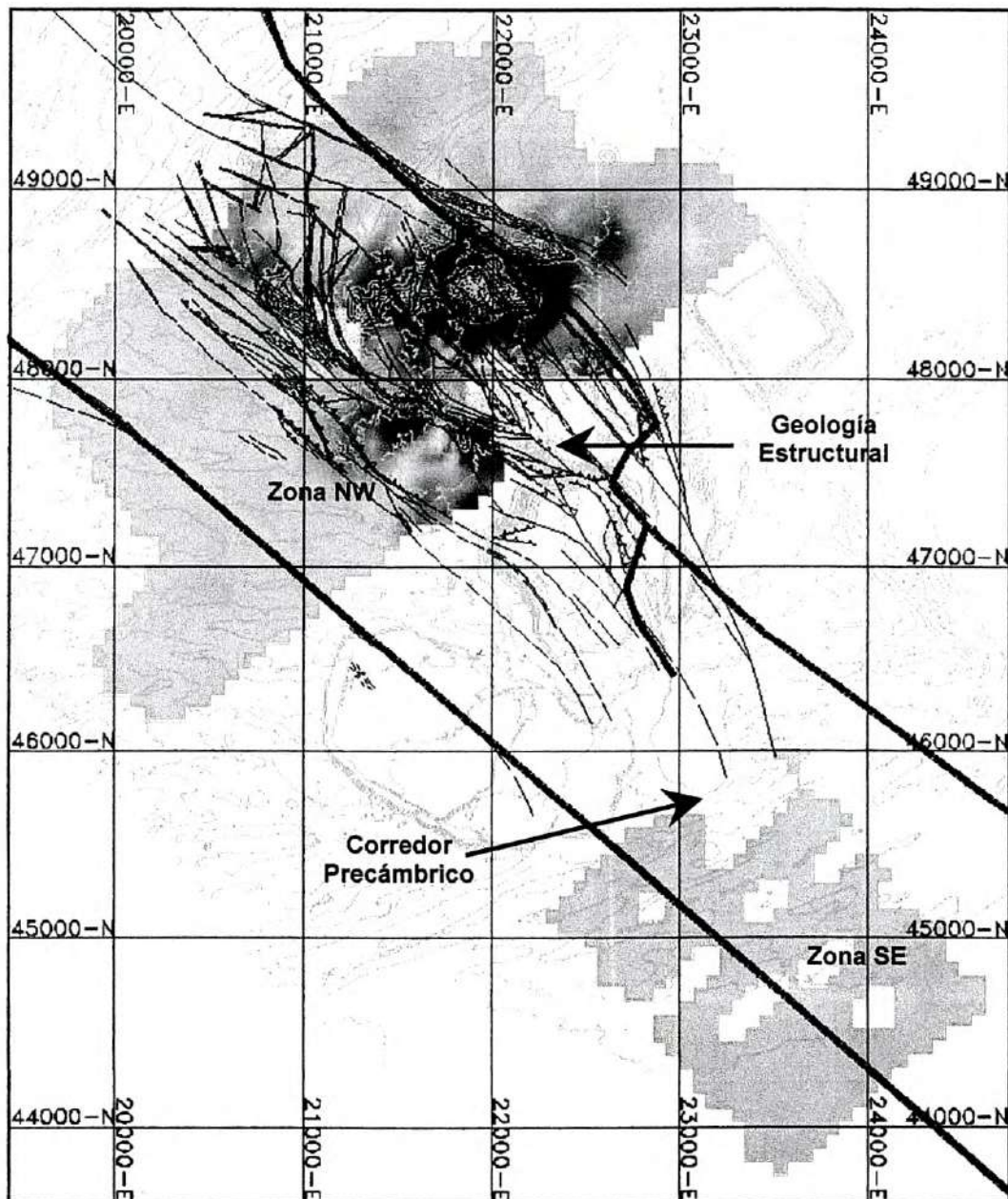


Figura 15.- Plano Geoquímica de MMI con geología básica Distrito Minero La Herradura

## Conclusiones

- La mina La Herradura descubierta en el año de 1991 es un depósito de Au con ley promedio de 1 gr/ton y contenidos superiores a los 3 millones de onzas. La región donde se localiza La Herradura es parte del Terreno Caborca; en los alrededores afloran rocas metamórficas del Proterozoico (gneis y esquisto), rocas sedimentarias del Paleozoico (caliza, dolomita y cuarcita), rocas del Jurásico inferior (metasedimento y metavolcánicas); también están presentes rocas andesíticas originadas por el sistema de Fallas de San Andrés. El depósito está ubicado en la proyección de la mega estructura Mojave – Sonora Megashear; parte de la historia tectónica de la región es la apertura del Golfo de California ocasionada por el sistema de la Falla de San Andrés.
- El yacimiento es del tipo mesotermal en zonas de cizalla, controlado por un sistema pre-mineral de fallas inversas reactivadas. La mineralización de oro ocurre en vetas y sistemas de vetillas de cuarzo, ubicadas en zonas de dilatación a lo largo de superficies de fallas desarrolladas preferentemente en un gneis cuarzo feldespático. Las zonas mineralizadas se caracterizan por la presencia de cuarzo, hematita, especularita y wulfenita.
- Gracias a los levantamientos geológicos en mina, nos permite llevar un control del mineral en el tajo. Con la geología estructural, la geofísica y el muestreo geoquímico, se han podido definir zonas anómalas, orientación de los cuerpos y ubicación de los mismos. Con toda esta información permitió identificar blancos de exploración y comprobar la existencia de los cuerpos cubiertos a partir de programas de barrenación.

- Con la perforación se han encontrado cuerpos minerales y el estudio detallado de los mismos aunado a la informática ha permitido obtener modelos geológicos que nos permiten tener un mejor conocimiento del depósito y del comportamiento de los cuerpos minerales. A partir de esta información y de los resultados de leyes generamos los modelos de bloques para cubicar y obtener la cantidad de mineral a extraer así como cubicar el material estéril a remover y mejorar los costos de producción para la mina.

## Bibliografía

- Anderson, T. H., and Silver, L. T. 1979, *The role of the Mojave-Sonora Megasear in the tectonic evolution of Northern Sonora*; Geological Society of America Annual Meeting.
- Altamirano, C. y Carreón, N., 1995, *Yacimientos Minerales y Modelo del Depósito La Herradura, H. Caborca, Sonora*: Informe no publicado, Minera Penmont.
- Bartolino, J., 1992, *The Altar Graben, Sonora, México. Definition interpretation and potential for gold Exploration*.
- Díaz de León, C. y López, M., 1995, *Litología y Alteraciones del Yacimiento La Herradura, H. Caborca Sonora*: Informe no publicado, Minera Penmont.
- Lang, R. J., 2003, *Fluid inclusion study of the La Herradura deposit*.
- Haxel, G. M. 1980, *Reconnaissance geology of the southern Papago Indian reservation*.
- Poole, F. G., Amaya-Martinez, R. and Sandberg, C. A., 2004., *Biostratigraphy and Paleotectonic Setting of Paleozoic Rocks North of Estación Sahuaro, Northwestern, Sonora, México. Abstract with Programs, Annual Meeting G.S.A. Denver, Co.*
- Salvatierra, E. y Novelo, L., 1995, *Geología y Exploración del Yacimiento La Herradura, H. Caborca, Sonora*: Informe no publicado, Minera Penmont.
- Stanton, Caddey, W., 2002, *Structural Setting, Tectonic Deformation La Herradura Gold Deposits, Northern Sonora, México*.